

VŠB - Technická univerzita Ostrava

Fakulta stavební

Katedra stavebních hmot a diagnostiky staveb

Bakalářská práce

Možnost náhrady portlandských cementů, cementy směsnými pro
betony používané při dálničních stavbách

Possible substitutes Portland cement, mixed cement for concrete used
in highway construction

Student:

Lucie Moržolová

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Jiří Šafrata

Ostrava 2016

Zadání bakalářské práce

Student: **Lucie Moržolová**
Studijní program: B3607 Stavební inženýrství
Studijní obor: 3647R019 Stavební hmoty a diagnostika staveb
Téma: **Možnosti náhrady portlandských cementů, cementy směsnými pro
betony používané při dálničních stavbách**
**Possible substitutes Portland cement, mixed cement for concrete used in
highway construction**
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Popište hydratační reakce a reakce probíhající při tuhnutí cementu a betonu.
2. Popište výrobu, složení a vlastnosti cementů používané v České republice
3. Popište latentně hydraulické vlastnosti příměsí do cementů a vliv na konečné vlastnosti cementu
4. Navrhněte složení betonu s cementy CEM I 42,5 R a CEM III 42,5 R z lokality Hranice. Připravte zkušební záměsí. Na čerstvém betonu stanovte konzistenci a obsah vzduchu. Na ztvrdlém betonu stanovte pevnost v tlaku, průsak tlakovou metodou a stanovení odolnosti vůči chemickým rozmrazovacím látkám a mrazuvzdornost.
5. Získaná data zpracujte přehledným způsobem, a vyhodnoťte vliv dávky JMS a způsob ošetřování na objemové změny.

Seznam doporučené odborné literatury:

Pytlík, P.: Technologie betonu, 2. vyd. BRNO: VUTUM, 2000. 390 stran. ISBN 80-214-1647-52000
Colleparidi, M.: Moderní beton, Informační centrum ČKAIT, s.r.o. 2009. 348 stran. ISBN 978-80-87093-75-7
Bajza, A., Rouseková, I.: Technológia betónu, Jaga group, 2006, 190 stran. ISBN: 80-8076-032-2
ČSN EN 206 Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda
ČSN 73 1322 Stanovení mrazuvzdornosti betonu,
ČSN 73 1326 Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jiří Šafrata**

Datum zadání: 30.10.2015

Datum odevzdání: 02.05.2016


Ing. Libor Židek
vedoucí katedry




prof. Ing. Radim Čajka, CSc.
děkan fakulty

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala samostatně za odborného vedení. Dále prohlašuji, že jsem uvedla použitou literaturu a další podkladové materiály.

V Ostravě dne

.....

podpis

Prohlašuji:

- Byla jsem seznámena s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- Beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB – TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB – TUO.
- Bylo sjednáno, že s VŠB – TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- Bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- Beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 2.5.2016

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Jiřímu Šafratovi za odborné rady, konzultace a poskytnuté materiály k práci. Dále bych ráda poděkovala všem zaměstnancům BETOTECHU, kteří mi vstřícně pomáhali s realizací mé praktické části bakalářské práce. V neposlední řadě děkuji také přátelům, Romanovi Siwému a své rodině, kteří měli trpělivost a podporovali mně ve studiu.

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá možností náhrady portlandských cementů, cementy směsnými pro betony používané při dálničních stavbách. Řeší se zejména agresivní prostředí XF3 a XF4. Cement směsný obsahuje podíl strusky. Použitím tohoto cementu se snižuje produkce CO₂ do ovzduší a šetříme tím životní prostředí.

V teoretické části je popsána výroba, složení a vlastnosti cementu v České republice. Dále jsou popsány hydratační reakce při tuhnutí cementu a betonu a vlastnosti latentně hydraulických příměsí.

V praktické části jsou popsány zkoušky, které se prováděly na čerstvém a ztvrdlém betonu dle platných norem v ČR. Byly navrženy a namíchány čtyři betonové směsi, které se lišily druhem cementu, agresivním prostředím a pevností. Z každého betonu byly vyrobeny vzorky, které byly vystaveny daným zkouškám a následně byly navzájem porovnávány.

Abstract

The bachelor's thesis examines the possible substitutes of Portland cement and mixed cement for concrete used in highway constructions. It focuses on aggressive environment XF3 and XF4. Mixed cement consist slag fraction. Use of this type of cement reduces CO₂ production and save the environment.

The theoretical part describes production, structure and properties of cement in the Czech Republic. It further describes hydrate reactions of cement and concrete solidification and properties of latent-hydraulic dashes.

The practical part describes testing of raw and indurate concrete according to test standarts in the Czech Republic. There were proposed and mixed four concrete dashes, which differed from type of cement, aggressive environment and resistance. Samples were made from each types of concrete, which were put to the tests and consequently compered with each other.

Klíčová slova

Cement, agresivní prostředí, portlandský cement, vysokopecní cement směsný, konzistence čerstvého betonu, obsah vzduchu v čerstvém betonu, pevnost v tlaku, hloubka průsaku tlakovou vodou, odolnost betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek, AVA, mrazuvzdornost

Key words

Cement, aggressive environment, portland cement, blast – furnace slag cement, consistency of fresh concrete, air void content in fresh concrete, compressive strength, depth of penetration of water under pressure, resistance of cement concrete surface to water and defrosting chemicals, Air Void Analyzer, frost resistance

Obsah

1.	Úvod.....	8
2.	Cementy	9
2.1.	Rozdělení cementů	9
3.	Hydratační reakce a reakce probíhající při tuhnutí cementu a betonu	10
3.1.	Hydratace slinkových minerálů.....	13
3.1.1.	Hydratační reakce alitu a belitu	13
3.1.2.	Hydratační reakce trikalcium aluminátu.....	13
3.1.3.	Hydratační reakce kalcium aluminátu feritu.....	14
4.	Výroba, složení a vlastnosti cementů používaných v ČR.....	14
4.1.	Výroba cementu	15
4.1.1.	Příprava surovinové směsi	15
4.1.2.	Výpal slínku.....	19
4.1.3.	Mletí slínku.....	22
4.1.4.	Cementářské moduly	23
4.2.	Složení cementu	24
4.2.1.	Mineralogické složení cementu	24
4.2.2.	Chemické složení cementu	24
4.3.	Fyzikální vlastnosti cementu.....	25
4.3.1.	Pevnost cementové směsi	25
4.3.2.	Měrný povrch cementu	25
4.3.3.	Objemová a sypaná hmotnost.....	26
4.3.4.	Počátek a doba tuhnutí.....	26
4.3.5.	Hydratační teplo.....	26
4.3.6.	Objemová stálost	26

4.3.7.	Smršťování betonu.....	27
4.3.8.	Množství alkálií v cementu.....	27
5.	Latentně hydraulické vlastnosti příměsí do cementů.....	28
5.1.	Popílek.....	28
5.2.	Struska.....	29
5.3.	Křemičité úlety.....	30
5.4.	Pucolán.....	30
5.5.	Vápenec.....	31
6.	Praktická část	32
6.1.	Popis laboratorních zkoušek	32
6.1.1.	Zkouška sednutím.....	32
6.1.2.	Obsah vzduchu.....	33
6.1.3.	AVA.....	35
6.1.4.	Pevnost v tlaku.....	36
6.1.5.	Hloubka průsaku tlakovou vodou	37
6.1.6.	Odolnost povrchu proti působení chemických rozmrazovacích látek ..	39
6.1.7.	Mrazuvzdornost	40
6.2.	Návrh zkušebních receptur.....	40
6.3.	Popis surovin.....	41
7.	Výsledky měření	41
7.1.	Zkoušky čerstvého betonu.....	41
7.1.1.	Konzistence a obsah vzduchu	42
7.1.2.	AVA.....	42
7.2.	Zkoušky ztvrdlého betonu.....	43
7.2.1.	Pevnost v tlaku.....	43
7.2.2.	Průsak tlakovou vodou	44
7.2.3.	Odolnost povrchu proti působení chemických rozmrazovacích látek ..	45

7.2.4.	Mrazuvzdornost	49
8.	Závěr	50
9.	Seznam literatury	52
	Seznam obrázku	54
	Seznam tabulek	55
	Přílohy	56

1. Úvod

Betonové konstrukce vyráběné na bázi hydraulických pojiv se ve stavebnictví používají déle než 2000 let (pravděpodobně od dob starověkého Říma). V dnešní době je beton jedním z nejpoužívanějších konstrukčních materiálů. Je tvarově univerzální, má velice dobrou pevnost v tlaku a soudržnost s ocelí. Z důvodu zvyšování užité hodnoty staveb se klade čím dál tím větší důraz na trvanlivost staveb. Tato bakalářská práce se zejména zabývá možnostmi náhrady směsnými cementy pro betony používané při dálničních stavbách, kde jsou vystaveny působení mrazu a chemických rozmrazovacích látek [1].

Beton je kompozitní stavební materiál. Jako základní složkou je plnivo, které je kamenivo, je pojené cementovým tmelem (voda + cement) neboli pojivem. V průběhu tuhnutí a tvrdnutí cementový tmel vytváří systém C-S-H gelů, ze kterých postupně vznikají krystaly. Tyto krystaly tvoří cementový kámen, který pojí dohromady kamenivo a tak tvoří jednotný systém [1].

Právě tento systém je vystaveny různým klimatickým a povětrnostním vlivům, které na něj působí a mohou vést ke ztrátě jeho vlastností, které od tohoto materiálu požadujeme [1].

2. Cementy

Cement je hydraulické pojivo. Je to jemně mletý organický materiál, který po smíchání s vodou vytváří kaši, která díky hydratačním reakcím a procesům tuhne a tvrdne. Po ztvrdnutí cement zachovává svoji stálost a pevnost ve vodě. Označení CEM dle normy ČSN EN 197-1 musí při vhodném dávkování a smíchání s vodou a kamenivem umožnit výrobu malty a betonu vhodnou zpracovatelnost po dostatečnou dobu. Po určené době si musí zachovat předepsanou pevnost a dlouhodobou objemovou stálost [4], [20].

Chemické vlastnosti cementů jsou určeny na jejich mineralogickém složení, které ovlivňuje rychlost hydratace cementu a výslednou pevnost betonu.

Cementy se dělí podle normalizované pevnosti v tlaku na tři třídy a to na 32,5, 42,5 a 52,5 MPa. Dále se dělí podle rychlostí vývoje počáteční pevnosti a to na cementy s normálními počátečními pevnosti (N) a cementy s vysokými počátečními pevnosti (R) [4], [20].

2.1. *Rozdělení cementů*

Cementy se dělí dle ČSN EN 197-1 do pěti hlavních druhů cementů: [20]

- CEM I Portlandský cement
- CEM II Portlandský cement směsný
- CEM III Vysokopecní cement
- CEM IV Pucolánový cement
- CEM V Směsný cement

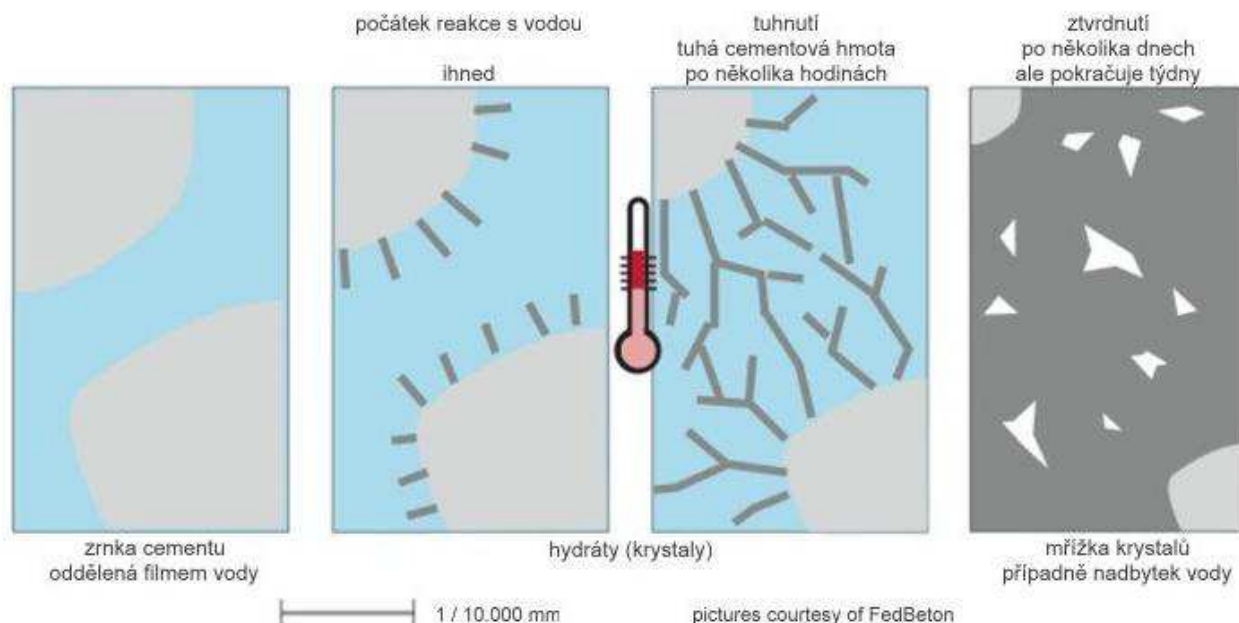
3. Hydratační reakce a reakce probíhající při tuhnutí cementu a betonu

Beton je konstrukčním materiálem a jeho pevnost a ostatní vlastnosti jsou díky hydrataci. Hydratace je souhrn chemických reakcí vody s cementem. Díky těmto reakcím beton přechází z dobře zpracovatelné plastické hmoty do materiálu podobnému kameni, to znamená do materiálu pevného a mechanicky odolného. Během chemických reakcí mezi vodou a cementem dochází ke dvěma změnám v závislosti na čase. V první změně dochází k poklesu zpracovatelnosti čerstvého betonu. Tato změna trvá dlouho, až cementová pasta úplně ztratí schopnost být tvarována, jedná se o tuhnutí. Druhá změna se nachází v postupném růstu pevnosti a to se jedná o tvrdnutí. V praxi se přechází plynule z jednoho procesu na druhý. Materiál se mění z plastické hmoty do stavu pevného a nakonec je velmi podobný kameni [2].

Dávka vody u hydratace cementu ovlivňuje konzistenci čerstvé kaše a každou vlastnost čerstvého nebo ztvrdlého betonu. Čím menší vodní součinitel v/c máme tím je větší koncentrace cementových částic v cementové kaši a následně má i pevnější strukturu. V zatvrdnuté cementové kaši, částice kameniva drží pohromadě. Většina důležitých vlastností betonu jako je pevnost, dotvarování, permeabilita jsou ovlivňována právě vlastnostmi zatvrdnuté cementové kaše [3].

Cement se skládá z několika různých složek, u kterých po smíchání cementu s vodou začínou probíhat hydratační reakce. Všechny složky, ale nemají stejnou rychlost u hydratace. Trikalciurní aluminát reaguje rychleji než silikáty. Tuhnutí cementové kaše nejvíce ovlivňuje hydratace aluminátu. Tvrdnutí nejvíce ovlivňují silikáty, kterých je v obyčejném portlandském cementu až 80 % [3].

Tuhnutí nastane při laboratorních podmínkách za hodinu nebo několik málo hodin. Při tuhnutí nemůže být beton ukládán ani zhutňován. Jakmile však začne tvrdnutí betonu, které nastává po jednom nebo několika dnech, je možné se pohybovat po povrchu betonové konstrukce a odstranit bednění. Pevnosti, která je navržena u daného betonu dosáhne při teplotě 20° C po 28 dnech zrání [2].



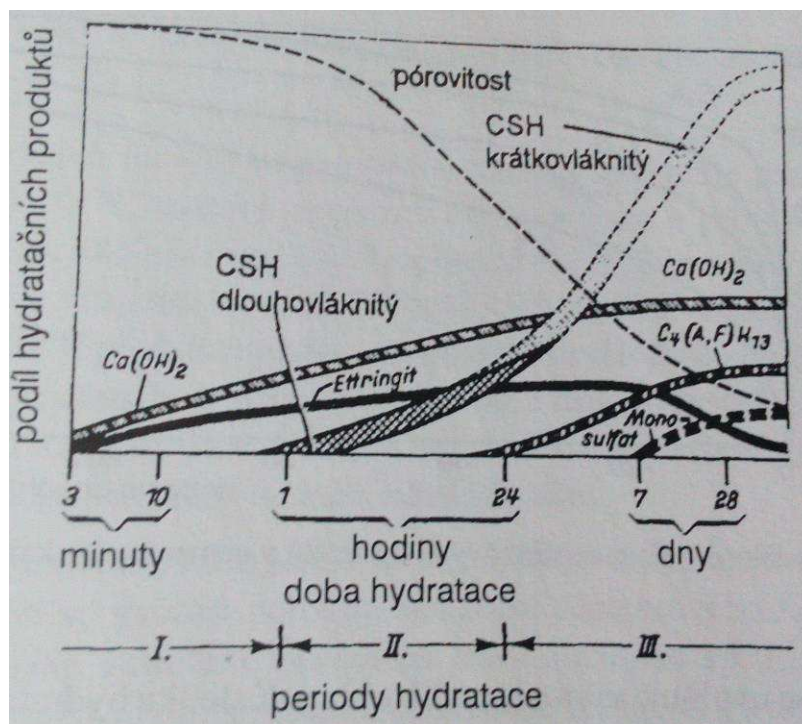
Obrázek 1: Hydratace cementu [4]

Rychlost hydratace je rovněž ovlivňovaná druhem a množstvím iontů v krystalové struktuře, velikostí krystalů, druhem a stupněm krystalových poruch. Rychlost hydratace je časově závislý proces a chemické složení je ovlivňováno vodním součinitelem, jemností mletí cementu a vnějšími podmínkami (teplota a vlhkost). S rostoucím hydratačním teplem se zvyšuje rychlost reakcí [1].

Hydrataci cementu lze rozdělit do několika period:

- 1. Perioda- indukční:** tady se perioda rozděluje na dvě období. První období je velmi krátké, trvá asi 10 – 15 minut a jedná se o smáčení zrn cementu. Dochází k prvním chemickým reakcím se slíkovými minerály. Dalším znakem je velká rychlost uvolňování hydratačního tepla a rozpouštění aluminátů a síranů, vzniká Ca(OH)_2 a ettringit. Druhé období končí 1 – 2 hodiny od zamíchání cementu s vodou. Probíhá u něj pomalé uvolňování hydratačního tepla, vzrůstá viskozita suspence (počátek tuhnutí cementu), tvoří se zárodky krystalů CH a C-S-H a ubývá silikátu. Voda proniká k zrnům cementu a vytvářejí se nové produkty hydratace. Pevnost tmelu je kolem 100kPa [1].

- 2. Perioda- přechod do tuhého skupenství:** u této periody se zvětšuje měrný povrch až 1000 krát, urychluje se stupeň hydratace a trvá od 1 do 24 hodin od zamíchání čerstvého betonu. Velmi rychle reaguje alit při vzniku dlouhovláknitého C-S-H a krystalů portlanditu. Přibližují se k sobě zrna cementu a to tím, že prorůstají krystaly hydratačních produktů. Všechno ale závisí na vodním součiniteli, když je moc vysoký zpomaluje se tuhnutí, protože jsou od sebe zrna moc vzdálena. V této periodě vzniká základ mikrostruktury cementového kamene, vzniká již tuhá látka s pevností kolem 1 až 20 MPa [1].
- 3. Perioda- stupeň stabilní struktury:** posledním dějem, který probíhá je vznik fáze drobnovláknité C-S-H, postupně ettringit přechází na monosulfát. Probíhá hydratace belitu a snižuje se vývin tepla. Tato perioda se dělí na klesající období rychlosti hydratace (asi do 28 dnů) a na období “dozrávání”, které trvá i několik let. Mezi zrny cementu vzniká rekrystalizace fází a v místě původních zrn cementu vzniká hydratační product difúzí vody hydratovanou obálkou zrn [1].



Obrázek 2: Schematické znázornění hydratace a tvorby novotvarů v časové závislosti [1]

3.1. *Hydratace slinkových minerálů*

Silikátový slínek se skládá z minerálů, které po reakci s vodou tvoří tuhou strukturu cementového kamene. V alkalickém prostředí vzniká reakce slinkových minerálů, které jsou vytvořeny rozpuštěným $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Hlavní minerály obsaženy v portlandském slínku jsou trikalcium silikát (alit), dikalcium silikát (belit), trikalcium aluminát a poslední je kalcium aluminát ferit [1].

Pro zjednodušení zápisu chemických vzorců se u chemie cementu běžně používají následující zkratky, které budu i nadále používat v této práci: C = CaO, H = H_2O , S = SiO_2 , F = Fe_2O_3 a A = Al_2O_3 .

3.1.1. Hydratační reakce alitu a belitu

Hydratace alitu (C_3S) a belitu (C_2S) je stechiometrický podobná, jednotlivé reakce se liší jen v množství vzniklého hydroxidu vápenatého viz vzorce (1), (2).



Trikalcium silikát + voda \rightarrow afwilit + hydroxid vápenatý

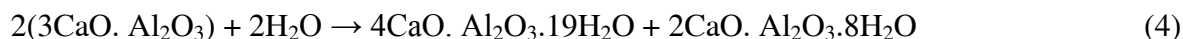


Dikalcium silikát + voda \rightarrow afwilit + hydroxid vápenatý

Hydroxid vápenatý zabezpečuje vysokou alkalitu cementového kamene (pH 12,5). Kvůli tomu jsou také směsi citlivé na působení kyselin a velmi dobře chrání ocelovou výztuž před korozí (prostředí, kde je pH větší jak 11 chrání výztuž před korozí) [3].

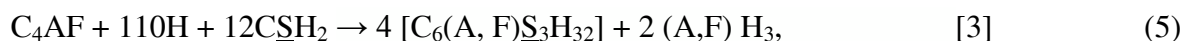
3.1.2. Hydratační reakce trikalcium aluminátu

Jemně rozemletý trikalcium aluminát (C_3A) velmi rychle reaguje s vodou a přitom se vytvoří velké množství hexagonálních destičkovitých krystalků C_4AH_6 . V prostředí, kde je relativní vlhkost kolem 80% tetraalkalium alumináthydrát (C_4AH_6) ztrácí část vody a mění se na C_4AH_{13} viz vzorce (3),(4), [3].



3.1.3. Hydratační reakce kalcium aluminátu feritu

Kalcium aluminát ferit představuje tuhý roztok a má proměnlivé složení, a to složení mezi C_6AF_2 a C_6A_2F . Pro zjednodušení se uvažuje jeho složení C_4AF . Reakce C_4AF je mnohem pomalejší než reakce C_3A a při reakci se uvolňuje menší množství tepla. Hydrataci zpomaluje zvýšené množství oxidu železitého. C_4AF vytváří stejné hydratační produkty jako C_3A . Různí autoři uvádějí jiným zápisem stejný vzorec hydratační reakce, viz vzorce (5), a (6), [3].



4. Výroba, složení a vlastnosti cementů používaných v ČR

Cementy jsou v současnosti nejpoužívanějším pojivem ve stavebnictví v ČR. Díky své stálosti a pevnosti, kterou si zachovávají i ve vodě jsou využívány v různých odvětvích, jako je konstrukční stavitelství a vodní stavitelství atd.[5].

Podle převažující aktivní složky rozdělujeme cementy do dvou skupin:

- Křemičitanové (silikátové) cementy: nejvýznamnějším zástupcem je cement portlandský, převaha křemičitanů vápenatých.
- Hlinitanové (aluminátové) cementy: převaha hlinitanů vápenatých, nepoužívají se na konstrukční stavby, používají se pro žárobetony, snášejí vysoké teploty.

4.1. Výroba cementu

Proces výroby cementu se skládá ze tří základních etap, a to příprava surovinové směsi, výpalu slínku a mletí slínku. Hlavním cílem výroby cementu je výroba portlandského slínku s požadovaným mineralogickým složením. Kvalita slínku závisí na složení surovin, vhodnosti složení a homogenitě surovinové směsi, procesu pálení a chlazení slínku [5].

Cementy se vyrábějí drcením, mletím a homogenizací surovin vhodného složení (vápence, slínovce) a následným výpalem připravené surovinové směsi nad mez slnutí (teplota výpalu je zhruba 1 450°C), čímž vznikne meziprodukt a to je slínek [5].

Slínek se po ochlazení a odležení rozemele s přísadami a příměsemi (přírodním nebo umělým sádrovcem - plní funkci regulátoru tuhnutí, struskou, popílkem) na velmi jemnou moučku (měrný povrch od 225 m².kg⁻¹) a to na výsledný produkt - cement [5].

Suroviny na výrobu cementu můžeme rozdělit na základní a pomocné. Základní jsou ty, které jsou potřebné ke vzniku hlavních slínkových minerálů. A ty následně můžeme rozdělit na hlavní a vedlejší. Jako hlavní suroviny jsou vápence, slíny, hlíny atd. Vedlejší suroviny se přidávají jen tehdy když, ze základních surovin není možno dosáhnout optimálního složení. Pomocné suroviny jsou ty, které umožní snížení potřebné vody (soda, vodní sklo), ulehčí mletí (kamenné uhlí, sulfátové výluhy), regulují tuhnutí cementu (sádrovec)... [5].

4.1.1. Příprava surovinové směsi

Základní suroviny používané při výrobě cementu:

Suroviny můžeme rozdělit do tří základních skupin, a to na:

- základní suroviny
- vedlejší suroviny
- pomocné suroviny

ZÁKLADNÍ SUROVINY tvoří převážnou část surovinové směsi, a podle chemismu se rozdělují na složky:

- **VÁPENATÉ**- vápence, slínovce, krystalické vápence (mramory), to znamená sedimentární horniny nebo horniny metamorfního původu. Jako převažující minerál by měl být kalcit. Nevhodné horniny jsou ty, kde je vyšší podíl dolomitu ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), protože oxid hořečnatý způsobuje rozpínání cementu. Optimální obsah CaCO_3 je 75 – 80 % hmotnosti [8].
- **JÍLOVITÉ**- jíly, hlíny jílovité břidlice, jílovce, slíny, to znamená sedimentární horniny, které obsahují jílové minerály, fáze tvořené s SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 . Tyto složky se nejčastěji přidávají do surovinové směsi, kde je základní složkou vysokoprocenní vápenec s CaCO_3 [8].

VEDLEJŠÍ SUROVINY slouží jako doplňující složka surovinové směsi. Přidává se v malém množství. Jsou to látky, které upravují obsah hydraulického oxidu. Nejčastěji se používá křemičitý písek, používají se loužence, známe také jako kyzové výpražky, při korekci Al_2O_3 se používá bauxit. Při korekci Fe_2O_3 se používají ocelářské kaly [8].

POMOCNÉ SUROVINY se používají pouze pro zlepšení vlastností při pálení, mletí slínku nebo zpracování a dávkuje se jen v malém množství [8].

Patří k nim zejména:

- Ztekucovadla: látky, které se používají u mokrého způsobu výroby cementu pro surovinový kal.
- Regulátory tuhnutí: látky, které po smíchání cementu s vodou regulují průběh tuhnutí cementu např. sádrovec $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.
- Mineralizátory: ovlivňují tvorbu slínkových minerálů
- Intenzifikátory pro výpal slínku: látky, které snižují viskozitu kapalně fáze při malém množství např. fluorit CaF_2 .
- Intenzifikátory pro mletí slínku: látky, které zkracují dobu mletí slínku.

Pro výrobu směsných cementů se používají přísady ke slínku a to:

- Latentně hydraulické látky: patří k nim zejména jemně mletá vysokopecní granulovaná struska
- Pucolány: patří k nim metakaolín, křemičitý úlet, vysokoteplotní suchý elektrárenský popílek [8]

Těžba cementářských surovin:

Povrchovým způsobem se v lomech těží vápenaté suroviny (vápenec, slínovec). Hornina je v současnosti nejčastěji oddělována clonovými odstřely, následuje odebrání horniny kolovými nakladači a doprava na dtírnu. Křemičité složky (hlíny, jíly), pokud nejsou primárně obsaženy ve vápencích, se taky těží povrchovým způsobem v hliništích. Při těžbě cementářských surovin jsou prováděny pravidelné analýzy chemického složení těžených hornin, aby se dosáhlo připravit optimální směs pro výrobu surovinové moučky. Těžba cementářských surovin probíhá většinou v blízkosti cementárny [5].

Drcení surovin:

Drcení suroviny pro výrobu cementu může být jednostupňové, většinou ale bývá dvoustupňové. Konkrétní podoba drcení suroviny vychází z vlastností zdobňované suroviny a z následné technologie výroby. U málo zpevněných, měkkých surovin se používá jednostupňové drcení. U toho způsobu se využívají kladivové drtiče. U lepidých surovin se používají kladivové drtiče s válci. Tvrdší materiály se drtí ve dvoustupňových linkách. První stupeň drcení jsou čelistové nebo kuželové drtiče a druhý stupeň drcení jsou kuželové, čelistové, odrazové nebo kladivové drtiče [5].

- **Čelistové drtiče** se používají pro střední a hrubé drcení houževnatých a tvrdých surovin. Materiál je drcený tlakem, lámáním nebo roztíráním v prostoru v průběhu pohybu mezi pevnou a pohybovou částí čelistí drtiče. V momentu, kdy se čelisti od sebe vzdalují, drcená hornina se přesune k výpustné štěrbině. Šířka výpustné štěrbině se může měnit, díky tomu můžeme získávat produkt požadované zrnitosti [6].
- **Kuželové drtiče** se používají na jemné, střední a hrubé drcení velmi pevných a obtížně drtitelných hornin. V tomto případě je materiál zdobňován mezi otáčejícím se drticím kuzelem a nepohyblivým drticím pláštěm [6].

- **Odrazové a kladivové drtiče** zdrobňují materiál prudkými údery drtících lišt nebo kladiv na rychle se pohybujících nepohyblivých pancéřových deskách. V úderových drtičích se drtí zrna v místech své nejmenší soudržnosti, to znamená podél štěpných ploch, různých trhlin a puklin [6].

V soustavě drtičů jsou vloženy třídiče, které slouží k vrácení nadsítých zbytků. Surovinová drť se uskládá na předhomogenizačních skládkách nebo v zásobnících [6].

Předhomogenizace surovinové směsi:

Pro dosažení vysoké a stálé kvality cementářského slínku a cementu je důležité dosáhnout vysoký stupeň homogenity vstupní surovinové směsi. V cementárnách se používají stupně homogenizace surovin, protože složení a kvalita vstupních surovin (vápence) je při těžbě většinou proměnlivá a surovinová směs se míchá z několika složek [5].

Předhomogenizační skládka zajišťuje dostatečnou zásobu suroviny a primární homogenizaci suroviny. Na skládku je ukládána podrcená surovina, která je dávkována do surovinového mlýna. Požadovaná homogenita vápence je zajištěna systémem zakládání a odebrání vápence. Tento proces homogenizace je plně automatizován a řízen laboratoří, skládku doplňují vzorkovací stanice [5].

Mletí surovinové směsi:

Mletí surovinové směsi patří mezi nejdůležitější fáze přípravy vstupních surovin před výpalem. Jeho technologie patří k energeticky i technologicky nejnáročnějším procesům. Během mletí je primárně homogenizovaná a podrcená surovina mletá na jemnou moučku (velikost zrna cca $n.10\mu m$), která je vhodná pro výpal v peci. Jemnost mletí má vliv na proces slinování a rychlost tvorby slínku při výpalu. V současnosti kde převládá suchý způsob výroby cementu, se pro mletí cementářské suroviny používají nejčastěji jednostupňové mlýnice s mechanickým oběhem (a uzavřeným mlecím okruhem) a současným sušením meliva [5], [7].

Tento typ mlýnice se charakterizuje tím, že částečně rozemleté melivo prochází třídičem, kde se odloučí prášek požadované zrnitosti a to je hotový produkt. Hrubší částice se vrací zpět do mlýna. Mlýnice jsou v dnešní době plně automatizovány a řízené dálkově z počítače nebo centra [5], [7].

Mlýny s volnými mlecími tělesy, tzv. kulové mlýny jsou nejčastěji používané jako zdrobňovací zařízení v cementárnách.

Kulové mlýny jsou duté válce nebo bubny a otáčejí se kolem vodorovné osy. Uvnitř jsou zčásti vyplněny volnými koulemi, které plní funkci mletí. Kvůli působení odstředivé síly se během otáčení mlýna mlecí koule vynášejí vzhůru a po dosažení dané výšky opadají dolů. Díky těmto úderům, roztíráním a tlaku je materiál rozemílán. Následně je namletá surovina uskladněna v homogenizačních silech [5], [7].



Obrázek 3: Surovinový mlýn [7]

4.1.2. Výpal slínku

Výpal slínku je nejdůležitějším úsekem technologického postupu při výrobě cementu. Slínek se vypaluje v cementářských pecích. Cementářské pece můžeme rozdělit na:

- **Rotační:** tyto pece kontinuálně pálí slínek, jsou nejčastěji používané pro svůj kvalitní výpal slínku, vysoký výkon a můžeme je používat pro suchý způsob výroby cementu, v minulosti se používal i pro mokré způsob výroby cementu [8].
- **Šachtové:** v dnešní době se nepoužívají pouze ve výjimečných případech např. pro autentický materiál pro použití v historických objektech, při použití toho typu vzniká horší kvalita slínku, mají malý výkon a obtížné řízení výpalu, Jsou použitelné pouze pro výpal sbalků [8].

Rotační pece jsou ocelové válce, které jsou vyloženy žárovzdornou vyzdívkou. Délka pecí s výměníkem tepla je při použití suchého způsobu výroby 60 – 100 m. Při použití mokrého způsobu výroby je délka 100 – 180 m. Pec má sklon 3 – 7°, její průměr je 3 – 7 m a otáčí se kolem osy s frekvencí 1 – 2 otáčky za minutu. Výkon rotační pece je kolem 500 – 4000 tun slínku za den [8].

Tepelná pásma rotační pece se skládá z částí:

- Sušící (do 200°C)
- Přehřívací (200 - 800°C)
- Kalcinační (800 - 1200°C)
- Exotermické (1300°C)
- Slinovací (až 1400 - 1450°C s poklesem na 1300°C)
- Chladicí (1100 - 1000°C)



Obrázek 4: Rotační pec pro suchý způsob výroby cementu [7]

- SUCHÝ ZPŮSOB VÝROBY CEMENTU

Suchý způsob výroby cementu vyžadují, aby se suroviny před výpalem vysušily. Sušení probíhá před mletím nebo současně s mletím v sušících mlýnech. Následně se surovina dopravuje do zásobníku nebo sil, kde probíhá homogenizace a úprava chemické struktury. Práškovitá směs se po přehřátí spaliny dopraví do pece, kde probíhá samotný výpal [1], [8].

Mezi největší výhody suchého procesu výroby cementu je podstatně nižší spotřeba tepla při pálení a sušení směsi a to 3100 – 3700 kJ v porovnání s mokrým procesem, kde na 1kg slínku bylo potřeba 5500 – 6300 kJ. Další výhodou je vysoká výkonnost výroby a vysoká tepelná účinnost vypalovacího procesu kvůli přehřívání surovinové směsi před výpalem spaliny [1], [8].

Suchý způsob výroby je nejvhodnější pro tvrdé suroviny s malou vstupní vlhkostí a málo kolísavým chemickým složením.

V České republice se v současné době vyrábí cement pouze suchým způsobem [1], [8].

- MOKRÝ ZPŮSOB VÝROBY CEMENTU

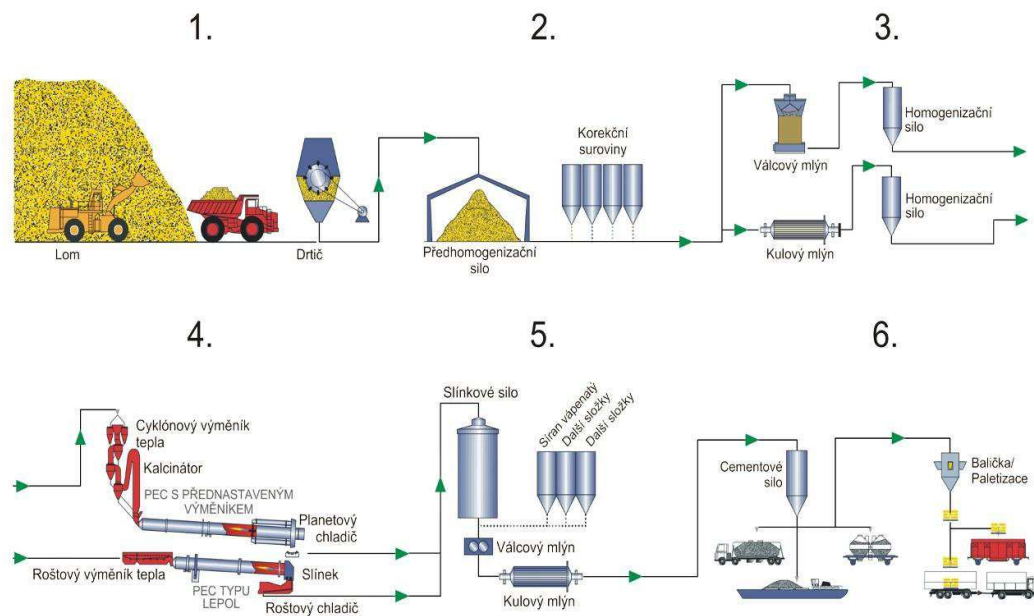
Z důvodu ekonomické náročnosti je tento způsob výroby cementu již minulostí.

U mokrého způsobu výroby cementu se vápenec drtí za sucha a následovně mele za mokra, většinou v bubnových mlýnech. V surovinovém kalu je obsah vody mezi 33 až 40%. Kal se postupně ukládá v kalových nádržích, kde dochází k neustálému mechanickému nebo pneumatickému promíchávání a tím se směs homogenizuje. Následně se kal převádí do menších zásobníků, odkud jde do pecí, kde se vysušuje a vypaluje do slinutí [1], [8].

Mezi výhody mokrého způsobu výroby cementu patří dobrá homogenizace suroviny a jednodušší příprava, vstupní surovina se nemusí sušit a snadněji se mele, což snižuje spotřebu elektrické energie. Díky použití vody je menší prašnost pracovního prostředí [1], [8].

Největší nevýhodou je velká energetická náročnost na vysušení kalu a také spotřeba vody. Mokrý způsob výroby je nejvhodnější pro pórovité suroviny s vyšší vstupní vlhkostí, pro měkké suroviny a pro suroviny s kolísavým chemickým složením [1], [8].

V roce 1990 byly ještě v ČR v provozu tři cementárny, které používaly mokrý způsob výroby. Produkovaly 14% celkového množství vyrobeného slínku. Dne 1. 1. 1998 byla zastavena poslední mokrá rotační pec v České republice [1], [8].



Obrázek 5: Zjednodušené technologické schéma výroby cementu [7]

Slínek, který se vypálí v cementářských pecích, se ochladí v chladičích a uskladňuje se buď v krytých halách, nebo ve velkoplošných zásobnících, kde se postupně odleží, dokončuje se jeho chlazení a případné volné CaO se vzdušnou vlhkostí vyhasí a zkarbonatizuje [1], [8].

4.1.3. Mletí slínku

Jemnost mletí slínku je zásadní operací vzhledem k použití cementu. Jemně mleté cementy mají větší počáteční a konečné pevnosti, velice rychle hydratují, protože mají větší měrný povrch, jsou plastičtější při zpracování a vyvíjejí větší hydratační teplo. U portlandského cementu je minimální jemnost mletí $225 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$. Mletí může být jednostupňové a to v troubových mlýnech s uzavřeným nebo otevřeným okruhem, nebo dvoustupňové a ty se skládají z krátkého mlýna na hrubé mletí a většího mlýna na jemné mletí [8].

Přísady při mletí slínku:

- HLAVNÍ (regulátory tuhnutí): přírodní sádrovec, energosádrovec, chemosádrovec
- VEDLEJŠÍ (upravují směsnost): jsou to přísady s hydraulickými vlastnostmi, přírodní nebo umělé pucolány, vysokopecní granulovaná struska,
- SPECIÁLNÍ (upravují vlastnosti a průběh mletí cementu): intenzifikátory mletí

Následuje skladování cementu v silech nebo volně ložený cement, balení a expedice cementu. [8].

4.1.4. Cementářské moduly

Posuzování vhodnosti složení surovinové směsi a i částečné hodnocení jeho vlastnosti nám pomáhají moduly. Hlavní složky cementu musí být v surovinové směsi zastoupeny v daných poměrech. Jedná se o modul hydraulický, křemičitanový a hlinitanový.

Hydraulický modul se pohybuje v rozmezí od 1,9 až 2,2. S rostoucím hydraulickým modulem roste i začáteční pevnost cementu, hydratační teplo, teplota slinování a snižuje se odolnost proti agresivním látkám. Když je modul větší, než 2,2 jedná se většinou o cementy, které jsou objemově nestále. Když modul klesne, pod hodnotu 1,9 jsou to cementy s nízkou pevností (7), [1], [2].

$$M_H = \frac{CaO}{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3} \quad (7)$$

Křemičitanový modul se pohybuje v rozmezí od 2,4 až 2,7. Slínek, který má vyšší hodnotu křemičitanového modulu, se hůře vypaluje. Takto vyrobený cement pomaleji tuhne a tvrdne, má nižší začáteční pevnost a hydratační teplo ale velice dobře odolává agresivnímu prostředí (8), [1], [2].

$$M_S = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3} \quad (8)$$

Hlinitanový modul se pohybuje v rozmezí od 1,5 až 2,5. Čím větší je hlinitanový modul, tím je více C_3A (trikalcium aluminát) v slínku a tím se zrychlí tuhnutí a tvrdnutí

cementu. Odolnost cementu proti agresivnímu prostředí, hydratační teplo a smršťování se zvýší (9). [1], [2].

$$M_A = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3} \quad (9)$$

4.2. Složení cementu

4.2.1. Mineralogické složení cementu

Hlavní petrografické složky portlandského cementu jsou trikalciumsilikát, dikalciumsilikát, tetrakalciumaluminátferit a trikalciumaluminát [1].

- TRIKALCIUMSILIKÁT (C₃S)- tzv. alit, rozkládá se pod 1250°C, rychle se slučuje s vodou a uvolňuje velké množství hydratačního tepla a vytváří tak velmi pevné produkty [1].
- DIKALCIUMSILIKÁT (C₂S)- tzv. belit, vytváří se při 300°C, na rozdíl od alitu, belit při hydrataci uvolňuje jen polovinu tepla i přes nízké hydratační teplo, konečná pevnost je srovnatelná s alitem [1]
- TETRAKALCIUMALUMINÁTFERIT (C₄AF)- tzv. celit, pomáhá při nárůstu pevnosti betonu po delší době a to jen na suchu. Zajišťuje objemovou stálost cementu [1]
- TRIKALCIUMALUMINÁT (C₃A)-rozkládá se při teplotě 1542°C na nestabilní fáze, tento minerál dosahuje malých pevností, okamžitě po smíchání s vodou hydratuje, čímž vyvíjí velké hydratační teplo [1]

4.2.2. Chemické složení cementu

Cement obsahuje ve větším množství oxid vápenatý, oxid křemičitý, oxid železitý, oxid hlinitý a oxid hořečnatý [1].

Nejdůležitějším oxidem je oxid vápenatý, protože je vázaný do minerálních složek, a volný. Málo CaO způsobuje klesání pevnosti a hodně CaO zase cement rozpíná. Podle

množství oxidu cementy rozlišujeme na křemičitanové (silikátové) a hlinitanové (aluminátové) [1].

- Procentuální zastoupení oxidu v cementu

CaO: 56 – 68%

SiO₂: 16 – 26%

Al₂O₃: 4 -8 %

Fe₂O₃: 1 – 8 %

MgO: 0 – 5% - max 5% (nebezpečí hořčnatého rozpínání)

SO₃: 0,5 – 4,5% - max 3,5 – 4,5% (nebezpečí síranového rozpínání)

4.3. Fyzikální vlastnosti cementu

4.3.1. Pevnost cementové směsi

Pevnost cementové směsi je hlavním kritériem posuzování vlastností směsí dle normy ČSN EN 196-1. Pevnost je schopnost odolávat vzniklým napětím v jejich hmotě. Porušení může být také jen lokální, které nezasahuje celý průřez, pak vzniká trhлина [1], [9].

4.3.2. Měrný povrch cementu

Měrný povrch cementu úzce souvisí se zrnitostí a velikostí částic (velikost od 1 do 250 μm). Dle normy ČSN EN 196-6 se zkouší metodou Blaine. Čím má cement větší měrný povrch, tím je hydratace rychlejší a úplnější. Hloubka hydratace cementového zrna za 6 měsíců je 3 až 15 μm a velikost nezhydratovaných částic cementových zrn bývá kolem 8 až 120 μm. Z toho vyplývá, že k úplné hydrataci velkých zrn cementu vůbec nedojde a jejich jádra jsou plnivem v cementovém kameni. Výroba cementu s větším měrným povrchem je energetický náročnější. Jemně mletý cement spotřebuje větší množství vody na smáčení a tím dochází k poklesu pevnosti [1].

4.3.3. Objemová a sypná hmotnost

Objemová a sypná hmotnost cementů pro betonářské výpočty je $3\,100\text{ kg/m}^3$, portlandský cement má objemovou hmotnost $3\,050$ až $3\,150\text{ kg/m}^3$, cement, který obsahuje větší množství strusky má objemovou hmotnost $3\,000\text{ kg/m}^3$. Volně ložený cement má 900 až $1\,300\text{ kg/m}^3$ a pytlovaný cement nebo cement uložený v silech má objemovou hmotnost $1\,200$ až $1\,700\text{ kg/m}^3$ [1].

4.3.4. Počátek a doba tuhnutí

Počátek a doba tuhnutí je veličina, která se zjišťuje Vicatovým přístrojem dle normy ČSN EN 196-3. Počátek tuhnutí je minimálně 45 až 60 minut obvykle ale trvá 3 až 5 hodin. Doba tuhnutí cementu je maximálně 12 hodin a bývá 4 až 6 hodin. S rostoucím obsahem vody se tuhnutí prodlužuje a se zvýšením teploty se doba zkracuje [1].

4.3.5. Hydratační teplo

Hydratační teplo je tepelným projevem hydratace cementu a je závislý na obsahu jednotlivých slinkových minerálů a tím i na druhu cementu. V průběhu hydratace se vyvíjí teplo různou intenzitou. V prvních minutách vývin hydratačního tepla prudce vzroste, ale následně se pomalu zmenšuje a ustálí [1].

4.3.6. Objemová stálost

Objemová stálost se zkoumá 24 hodin při teplotě 20 °C pomocí Le Chatelierovy objímky dle normy ČSN EN 196-3. Roztažnost objímky nesmí být větší jak 10 mm . Často roztažnost bývá pouze 1 mm . Cementový kámen nesmí prokázat žádné trhlinky, odštěpky a nepřiměřené objemové změny. Důvodem rozpínání je nadměrný obsah volného CaO , MgO a síranu vápenatého [1].

4.3.7. Smršťování betonu

Smršťování betonu je důsledek postupného vysychání cementového tmelu a smršťování cementové malty. Velikost je ovlivněna druhem a množstvím cementu a množstvím vody. Cementy jemně mleté vyšších tříd zvyšují smršťování betonu, stejně jako velké množství vody a vyšší dávka cementu. Hrubozrnné betony se smršťují méně než betony jemnozrnné. Na velikost smrštění má vliv napětí vodních par okolního prostředí, kapilární jevy, vodní součinitel, migrace vlhkosti mezi různě velkými kapilárami, pórovitost a teplota směsi [1], [9].

Existují tři typy smrštění:

- **SMRŠTĚNÍ VYSYCHÁNÍM:**- ke smrštění vysycháním dojde, když uniká voda z betonu do okolí, kdy již beton začal tuhnout a tvrdnout. Smrštění vysycháním závisí na mnoha parametrech. Např. na relativní vlhkosti, na době, po kterou je beton vystaven prostředí s nízkou relativní vlhkostí, na složení betonu, na množství výztuže... Pokud je beton ukládán pod vodou nastane tzv. bobtnání [2], [4].
- **PLASTICKÉ SMRŠTĚNÍ:** - tento typ smrštění nastává do 10-12 hodin po uložení betonu a pouze v případě kdy je beton vystaven vzduchu s relativní vlhkostí nižší než 95%, působení větru a vysoké teploty. Mikrotrhliny vzniknou, pokud je tahové napětí vyšší než tahová pevnost betonu [2].
- **AUTOGENNÍ (CHEMICKÉ) SMRŠTĚNÍ:**- je smrštění kdy objem vody a pojiva před samotnou hydratací je větší než výsledný objem ztvrdlého cementového tmelu. Při hydrataci vzniká hydratační teplo, které se roznese do okolí [2], [4].

4.3.8. Množství alkálií v cementu

Dle normy ČSN EN 196-2 se množství alkálií v cementu stanovuje referenční nebo alternativní metodou. Podstata zkoušky u referenční metody je, že při těkání alkalických kovů v plameni butanu, propanu nebo acetyleny vzniká ve viditelné oblasti charakteristické spektrum. Při malé koncentraci je úměrná emise obsahu alkálií. Velké množství oxidu vápenatého ve vzorku na stanovení sodíku se tlumí kyselinou fosforečnou. U alternativní metody na cementy, o obsahu nerozpustných zbytku menších než 3 % působí kyselina

chlorovodíková. U cementu, jehož nerozpustný zbytek je větší než 3 % se nejprve zbytek odkouří kyselinou fluorovodíkovou nebo kyselinou sírovou. Obsah alkálií v roztocích se stanoví plamennou fotometrií [21].

5. Latentně hydraulické vlastnosti příměsí do cementů

Latentní hydraulická je schopnost látky reagovat s Ca(OH)_2 za normální teploty a ve vodném prostředí tvrdnout. Pucolánové látky mají podobné vlastnosti a vyznačují se tím, že mají vysoký obsah aktivního SiO_2 . Aby mohla vzniknout chemická reakce, musí být vytvořené alkalické prostředí v roztoku i jinými chemickými sloučeninami. Tyto látky nazýváme budiče hydraulicity. Latentně hydraulické příměsi se přidávají jako složka do cementu během mletí slinku nebo do čerstvého betonu při jeho míchání [1], [4].

5.1. Popílek

Popílek vzniká spalováním uhlí a je zachycován v odlučovačích. Z energetického hlediska představuje značný objem odpadu ale z hlediska ekologického je žádoucí jeho využívání. Popílek má velice proměnlivé chemické, mineralogické a granulometrické složení. Jeho složení je ovlivňováno druhem spalovaného uhlí, z jaké lokality je uhlí a způsob odlučování z exhalátů. Podle typu spalovaného uhlí vznikají popílků vápenaté a křemičité [1], [22].

- Vápenatý popílek (W) má hydraulické a pucolánové vlastnosti a jedná se o jemný prášek, který se sestává zejména z aktivního oxidu vápenatého, oxidu křemičitého a oxidu hlinitého [22].
- Křemičitý popílek (V) je jemný prášek, který se sestává převážně z kulových částic s pucolánovými vlastnostmi. Jeho složení zejména tvoří aktivní oxid křemičitý a oxid hlinitý. Obsah aktivního oxidu křemičitého musí být menší než 25 % hmotnosti [22].

Další druhem je popílek z černého uhlí- typ F má vysokou pucolánovou aktivitu, protože obsahuje velké množství amorfní siliky a díky tomu je vhodnější příměsí do betonu než popílek z hnědého uhlí. Popílek z hnědého uhlí- typ C má velký obsah CaO . V ČR je kolem 80 % popílků z hnědého uhlí. Podle mineralogického složení můžeme

v popílkách určit hydraulicky aktivní složky (Ca-alumináty, Ca-silikáty, Ca-ferity...), nehydraulické minerály, které někdy působí jako budiče hydraulicity a budící složky hydraulicity (anhydrit, CaO, MgO) a budící složky hydraulicity jako jsou alkalické soli a sulfidy. Popílký, které obsahují velké množství SiO_2 působí jako pucolány. Pucolanita se projevuje u popílku velmi pomalu a je zjištělná za 90 dnů. Černouhelné popílký většinou obsahují skelné kuličky, které jsou velikostně podobné zrnům cementu. Hnědouhelné popílký mají tvar zrn nepravidelný [1], [2].

Pucolánové vlastnosti popílku jsou z větší části tvořeny reakcí sklovité fáze s hydroxidem vápenatým. Hlavní krystalické složky popílku je křemen (SiO_2), mullit ($3 \text{ Al}_2\text{O}_3 \cdot 2 \text{ SiO}_2$), hematit (Fe_2O_3) a magnetit (Fe_3O_4).

Dalším typem je fluidní popílek, který vzniká při fluidním spalování mletého uhlí s příměsí vápence při nižších teplotách (max. 850°C). Fluidní popílký obsahují hodně vápníku a síru. Používá se jako součást pojiv a násypový materiál. Musíme však dávat pozor na objemovou stálost. Fluidní popílek se nesmí používat do konstrukčních betonů [1], [10], [11].

Popílek zlepšuje některé vlastnosti betonu, jako je např. trvanlivost, vodotěsnost, čerpatelnost a zpracovatelnost betonu, ale zvyšuje potřebný vodní součinitel, protože část vody se spotřebuje k adsorpci na povrchu zrn popílku. Popílek snižuje hloubku karbonatace betonu a smrštění betonu. Hydraulický aktivní popílek zvyšuje pevnosti betonu [1], [10], [11].

5.2. Struska

Vysokopeční struska je odpadním materiálem při výrobě železa ve vysokých pecích. Pokud dojde k rychlému ochlazení (granulovaná struska), zatvrdne ve skelném stavu a tvrdne ve vodě sama, bez jakéhokoliv přídatku vápna, takže se chová jako latentně hydraulická látka. Vápno (Ca(OH)_2) velmi urychluje tvrdnutí strusky, protože plní funkci katalyzátoru hydratačního procesu.

Vlastnosti betonu ze struskoportlandských cementů, které mají obsah 60 – 80 % strusky mají velmi nízké hydratační teplo než v případě pucolánových cementů. Důvodem je, že pucolány potřebují vyšší dávku cementu, protože se účastní přímo reakce hydratace.

U struskoportlandských cementů je vápno pouze jako katalyzátor hydratace, proto ho stačí jenom nepatrné množství. [2].

5.3. Křemičité úlety

Křemičité úlety jsou odpadním materiálem některých hutnických provozů. V současnosti se již účelově vyrábí a jsou dodávány v suspenzi a v prášku. Křemičité úlety jsou užívané v betonu jako příměsi již více než 70 let. Vyznačují se dobrými pucolánovými vlastnostmi a mimořádně velkým měrným povrchem. Křemičité úlety obsahují 90 – 98 % amorfního SiO_2 ve tvaru kulatých zrn, které mají měrný povrch 15 000 až 25 000 m^2/kg a měrné hmotnosti 2 120 kg/m^3 . Vyžaduje se ztráta žíháním do 4 % po dobu 1 hodiny. Křemičité úlety zlepšují vlastnosti čerstvého betonu, jako je bleeding (krvácení betonu), odmísení, čerpatelnost a zvyšují potřebné množství vody [1], [2].

Křemičité úlety také ovlivňují pórovitou strukturu betonu a vlastnosti ztvrdlého betonu jako je např. zvyšování pevnosti betonu i při menším množství použití cementu. Používají se pro vysokohodnotné betony s pevností v tlaku 75 MPa. Další pozitivní vlastností křemičitých úletu je zvýšená odolnost proti agresivním mediím, snižují rychlost karbonatace betonu a omezují alkalický rozpad kameniva. Nejčastěji se křemičité úlety dávají 5 % až 10 % hmotnosti cementu. V praxi se křemičité úlety používají do stříkaného betonu a do samozhutnitelných betonů. Křemičitý úlet se kombinuje se superplastifikátorem, aby se vyrovnala vysoká spotřeba vody [1], [2].

5.4. Pucolán

Pucolán je jemný písečný sopečný popel, který pod vodou netvrdne. Proto není sám o sobě hydraulickým pojivem. Situace se mění, kdy se přidá vápno, to se pucolán chová jako výborná hydraulická maltovina s velmi dobrými vlastnostmi jako je pevnost a trvanlivost. Pucolánová aktivita je způsobená interakcí vápna s amorfni látkou a vodou [2].

Portlandský cement po rozmíchání s vodou uvolňuje vápno a to je schopné reagovat s pucolánem. Ale aby k tomu došlo je zapotřebí zvolit vhodný poměr těchto složek (alespoň 40 – 50 % portlandského cementu), aby během hydratace vzniklo dostatečné množství vápna pro reakci s pucolánem [2].

Mezi nejlepší výhody pucolánových cementů zejména patří pomalejší uvolňování hydratačního tepla, což je způsobeno nižším podílem slínku ve směsi. Dále jsou pucolanové cementy odolnější vůči některým chemickým látkám, mořské vodě a síranům. Snižují alkalicko – křemičitou reakci a jsou odolnější vůči chloridům, což znamená lepší odolnost ocelové výztuže. Tato vlastnost je velice důležitá pro železobetonové konstrukce, které jsou vystavené působením mořské vody, nebo pro vozovky, které musí v zimním období odolávat rozmrazovacím solím, které obsahují chloridy [2].

5.5. Vápenec

Vápence patří mezi horniny sedimentární a na jejich vzniku se podílely biogenní i chemické procesy. Cement může využívat vápenec jako složku surovinové směsi a jako složku cementu [23].

Jako složka surovinové směsi pro výpal portlandského slínku se musí vápenec doplňovat sialitickými surovinami, které obsahují množství oxidu hlinitého, křemičitého a železitého. Sialitické suroviny se přidávají, aby mohly vzniknout sloučeniny, které mají hydraulické vlastnosti cementu. Nejlepší vápenec je takový, který má přirozený obsah složek, které nevyžadují další úpravu. V cementářství je nevýhodné zpracovávat čisté vápence, a to u důvodu že jsou tvrdé a špatně se melou. Během výpalu jsou méně reaktivní a hůře se slinují [23].

Při použití vápence jako složky cementu musí vápenec splňovat následující požadavky. Obsah uhličitanu vápenatého, který je vypočteny z obsahu oxidu vápenatého, musí být nejméně 75% hmotnosti a obsah jílovitého podílu, který je stanoven zkouškou methylenovou modří dle EN 933-9, nesmí být větší než 1,20g/100g [23].

6. Praktická část

Praktická část mé bakalářské práce je zaměřená na sledování vlastností při působení vybraných agresivních prostředí XF3 (vysoké nasycení vodou bez rozmrazovacích prostředků) a XF4 (vysoké nasycení vodou s rozmrazovacími prostředky nebo mořskou vodou). Konkrétně se to týká betonů vyrobených z CEM I 42,5 R a CEM III / A 42,5 N z cementárny Hranice.

V úvodu praktické části jsou popsány laboratorní metody, které jsem použila při zkoušení mechanických vlastností na čerstvém a ztvrdlém betonu.

6.1. *Popis laboratorních zkoušek*

Na čerstvém betonu jsem v laboratoři zkoušela konzistenci betonu pomocí kužele, obsah vzduchu a AVA.

6.1.1. Zkouška sednutím

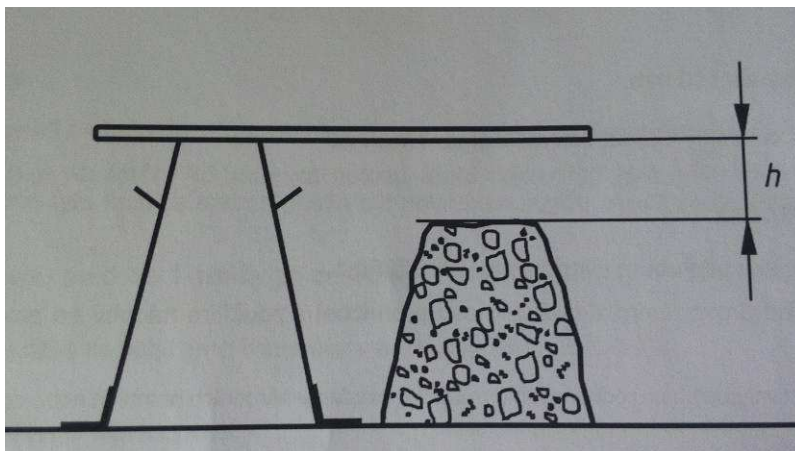
Principem zkoušky je zjistit konzistenci čerstvého betonu. Zkouška se provádí následujícím způsobem podle normy ČSN EN 12350-2 [12].

Podkladní deska a forma komolého kužele se před zkoušením navlhčí vodou. Forma se položí na podkladní desku a během plnění musí být forma přišlápnutá pomocí dvou příložek [12].

Následně se forma plní čerstvým betonem ve třech vrstvách, každá přibližně jedné třetiny výšky kužele. Každou vrstvu musíme hutnit 25 vpichy propichovací tyčí. Vpichy se provádí rovnoměrně po celé ploše vrstvy. První vrstva se zhutňuje přes celou výšku, musíme dávat pozor, aby tyč nenarážela na dno. Druhá a třetí vrstva se hutní přes celou výšku a vpichu můžou zasahovat mírně do předešlé vrstvy. Třetí vrstva se před zhutňováním přeplní betonem nad horní okraj kužele [12].

Po zhutnění poslední vrstvy se odebere přebytečný beton a rovněž se beton odstraní z pokladní desky. Formu opatrně zvedneme svislým pohybem nahoru. Zvedání formy nesmí být delší než 5 sekund [12].

Po zvednutí formy se změří sednutí kužele. Hodnotu zjistíme tak, že přiložíme pravítko a výsledkem je rozdíl mezi výškou formy a nejvyšším bodem sednutého kužele. Odečtena hodnota se zaznamená s přesností na 10 mm [12].



Obrázek 6: Zkouška sednutí kužele dle ČSN EN 12350-2 [12]



Obrázek 7: Zkouška sednutí kužele v laboratoři

6.1.2. Obsah vzduchu

Obsah vzduchu dle normy ČSN EN 12350-7 zkoušíme v tlakoměrné nádobě. Nádobu je válcového tvaru z oceli nebo jiného tvrdého kovu, který nesmí reagovat s cementovou

kaší. Objem této nádoby je 5 l. Po namíchání čerstvého betonu, se nádoba naplní lopatkou, aby se odstranilo co největší množství vzduchových dutin. Když máme naplněný tlakový hrnec po okraj, dáme ho zhutnit na vibrační stůl a doplníme hrnec betonem [13].

Příruba hrnce a víka se důkladně očistí a víko se připevní k nádobě třemi svorkami. Musíme zajistit víko, aby bylo k hrnci neprodyšně připevněno. Hlavní ventil pro přívod vzduchu se uzavře a zbývající dva ventily se otevřou. Přístroj se plní vodou tak dlouho, dokud z jednoho ventilu nevytéká voda. Poklepeme lehce paličkou na přístroj, aby se odstranily vzduchové bubliny. Následně uzavřeme ventil na vypouštění vzduchu a do vzduchové komory se napumpuje vzduch, dokud ručička tlakoměru neukazuje počáteční hodnotu tlaku. Vzduch necháme na chvíli stlačený, aby se vyrovnala jeho teplota s okolní teplotou. Dva ventily se uzavřou a otevře se hlavní ventil vzduchu. Ostře se poklepe na boční stěny hrnce. Na tlakoměru se odečte hodnota tlaku, která odpovídá objemu obsaženého vzduchu v procentech. Než sundáme víko, otevřeme dva ventily, aby se uvolnil tlak [13].

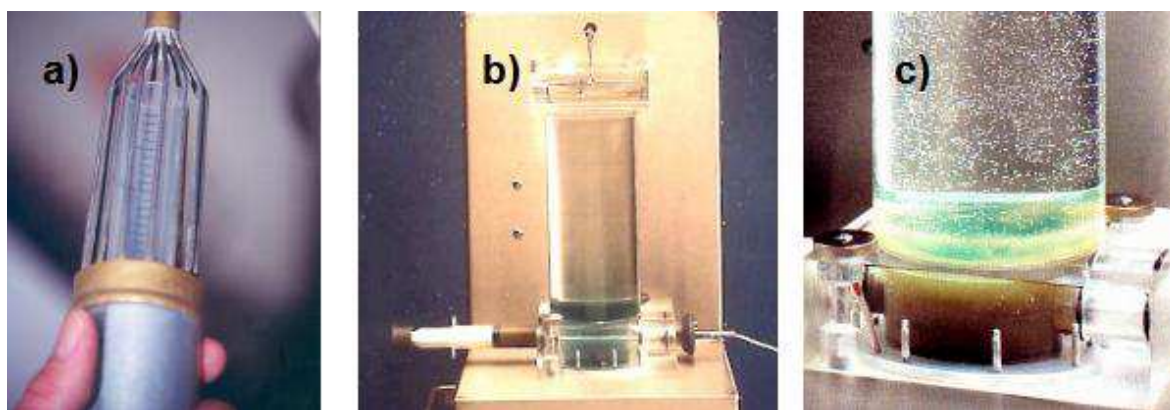


Obrázek 8: Zkoušení obsahu vzduchu čerstvého betonu

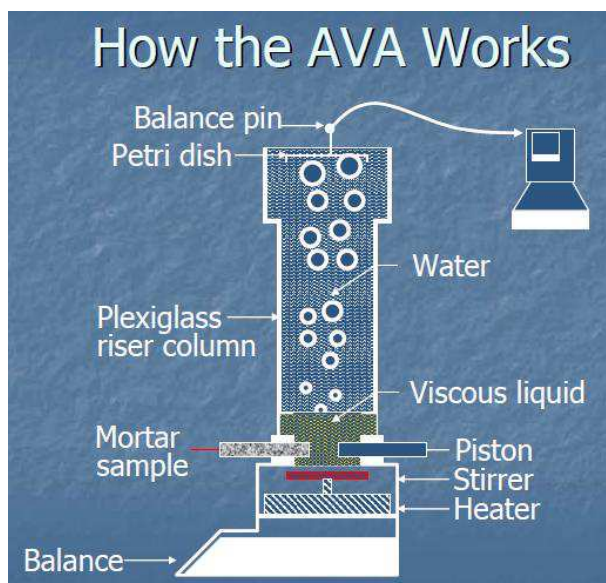
6.1.3. AVA

Podstatou zkoušky je zjistit obsah vzduchových pórů v čerstvém betonu. Zkouška trvá přibližně 25 minut. Prvním krokem je odebrání vzorku do drátěné klece (viz obrázek 9a), kde se uprostřed nachází injekční stříkačka. Po odebrání vzorku se injekční stříkačka umístí ve spodní části přístroje, kde je modrá kapalina. Vzorek se pomalu uvolňuje ve spodní části (viz obrázek 9b). Čerstvý beton a modrá kapalina se pomalu promíchají a vzduchové dutiny se následně uvolňují (viz obrázek 9c). Větší bubliny se uvolňují rychleji než bubliny menší [24], [25].

V horní části vodního sloupce je umístěna váha. Jednotlivé bubliny se hromadí na váze. Hmotnost váhy je zaznamenána v průběhu času. Počítač, který je připojený k váze vše zaznamenává a na konci zkoušky na základě zaznamenaných dat vyjede protokol kde je hodnota spacing faktoru, obsah vzduchových pórů a obsah vzduchu v cementové pastě. Kromě toho software vytváří graf velikosti bublin a histogram různých velikostí bublin, viz příloha [24], [25].



Obrázek 9: Jednotlivé kroky zkoušky [25]



Obrázek 10: Přístroj potřebný ke zkoušce AVA [24]

Na ztvrdlém betonu jsem zkoušela pevnost v tlaku, průsak tlakovou metodou a stanovení odolnosti vůči chemickým rozmrazovacím látkám.

6.1.4. Pevnost v tlaku

Pevnost v tlaku označuje velikost napětí dosaženého v místě při zániku celistvosti betonu. Podle normy ČSN EN 12 390-3 se pevnost v tlaku zkouší na krychlích o délce hrany 150 mm [4], [14].

Před zkouškou se zkušební krychle zváží a změří. Následně se umístí zkušební krychle do lisu, musí být umístěny kolmo na směr plnění. Potom lis krychli plynule zatěžuje rychlosti $0,6 \pm 0,4 \text{ MPa.s}^{-1}$ tak dlouho dokud nedojde k porušení zkušební krychle [4], [14].

Pevnost v tlaku se vypočítá ze zatěžovací síly a tlačné plochy viz vzorec (10). Vypočítána hodnota pevnosti v tlaku se zaokrouhlí na $0,5 \text{ N.mm}^{-2}$ ($\text{N.mm}^{-2} = \text{MPa}$) [4], [14].

$$f_{c,cube} = \frac{F}{A} \quad [\text{MPa}] \quad (10)$$

kde:	$f_{c,cube}$	pevnost v tlaku	$[\text{N/mm}^2]$
	F	maximální zatížení při porušení	[N]
	A	zatěžovaná plocha zkušební krychle	$[\text{mm}^2]$



Obrázek 11: Zkoušení 2 - denní pevnosti v tlaku

6.1.5. Hloubka průsaku tlakovou vodou

Dle normy ČSN EN 12 390-8 je podstata zkoušky taková, že se nechá tlakovou vodu působit na povrch ztvrdlého betonu, následně se zkušební krychle rozlomí a změří se hloubka průsaku vody [15].

Před samotnou zkouškou se plocha zkušební krychle, která bude vystavená působení vodního tlaku, musí ihned po odformování zdrsnit ocelovým kartáčem. Potom se zkušební krychle dá do vody a nechá se zrát minimálně 28 dnů [15].

Po 28 dnech se zkušební krychle upne do zařízení a nechá se působit vodní tlak 500 kPa po dobu 72 hodin. Po skončení působení vodního tlaku, vyjme se zkušební krychle a povrch, na který působil vodní tlak, se utře, aby se odstranila přebytečná voda. Zkušební krychle se rozlomí v polovině, kolmo k povrchu, na který působil vodní tlak. Když oschne

lomová plocha, zřetelně uvidíme hranici průsaku na zkušební krychli. Hranici zaznameneáme a změří se největší hloubka průsaku na nejbližší milimetr [15].



Obrázek 12: Hloubka průsaku tlakovou vodou



Obrázek 13: Rozlomená zkušební krychle s vyznačenou hloubkou průsaku

6.1.6. Odolnost povrchu proti působení chemických rozmrazovacích látek

Odolnost povrchu proti působení chemických rozmrazovacích látek se zkouší dle normy ČSN EN 73 1326 a ČSN EN 73 1326 Z1 v automaticky programovaném cyklovacím zařízení, které umožňuje provádění cyklického zmrazování a rozmrazování [16], [19].

Do přístroje se uloží zkušební krychle v miskách, ve které je pod dnem umístěno chladič a ohřívací zařízení. Do misky je nalije 3% roztok NaCl (chloridu sodného) v takovém množství aby zkušební krychle byla ponořena na výšku ± 5 mm [16], [19].

Ve zkušebním zařízení se zkušební krychle podrobí střídavému zamrazení a rozmrazení. Cyklus začíná zmrazením krychlí na teplotu -15 °C a na této teplotě se udržuje po dobu 15 minut. Pak následuje ohřev na teplotu $+20$ °C, opět se tato teplota udržuje po dobu 15 minut. Tímto končí 1 cyklus [16], [19].

Po každém 25 cyklu se zkušební krychle s miskou opatrně vyjme. Následuje vyčištění vody a odpadlé částice z krychle zůstanou v misce. Následně se odpadlé částice vysuší v sušárně při teplotě 105 °C, pak vysušený odpad zvážíme s přesností na $0,1$ g [16], [19].



Obrázek 14: Zkušební krychle po 150 cyklech

6.1.7. Mrazuvzdornost

Podle normy ČSN 73 1322 a ČSN 73 1322 Z1 zkouška mrazuvzdornosti spočívá na zmrazování a rozmrazování zkušebních trámců ve zmrazovacích cyklech [17], [18].

Jeden zmrazovací cyklus se skládá ze 4 hodin zmrazování a 2 hodin rozmrazování.

Zkušební trámce se před prvním vložením do mrazicího prostoru přístroje vyjmou z vody, povrchově usuší a zváží. Následně se podrobí požadovanému počtu zmrazovacích cyklů po etapách [17], [18].

Když se ukončí zmrazovací etapa, zkušební trámce se povrchově osuší a změří se jejich rozměry, hmotnost a objemová hmotnost. Následně se na zkušebních trámcích zkouší pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku na koncích trámců [17], [18].

Výsledkem zkoušky je zjištění úbytku hmotnosti zkušebních trámců při zmrazování a rozmrazování [17], [18].

6.2. Návrh zkušebních receptur

První dvě receptury byly navrženy na pevnostní třídu C 25/30 s odolností na vliv prostředí XF3 a zbylé dvě na pevnostní třídu C 30/37 s odolností na vliv prostředí XF4.

Tabulka 1: Návrh zkušebních betonových směsí

	C 25/30	C 25/30	C 30/37	C 30/37	
označení	P30	S30	P37	S37	jednotka
CEM I 42,5 R	330		390		[kg]
CEM III / A 42,5 N		330		390	[kg]
Kam. 0/4 Tovačov	808	808	738	738	[kg]
Kam. 4/8 Tovačov	140	140	134	134	[kg]
Kam. 8/16 Hrabůvka	857	857	854	854	[kg]
Voda	180	180	173	173	[l]
Superplastifikator	1,98	1,98	2,96	2,96	[l]
Provzdušňovací přísada	1,17	1,17	1,4	1,4	[l]
w/c	0,5	0,5	0,45	0,45	

6.3. *Popis surovin*

- **CEM I 42,5 R:** - Portlandský cement obsahuje min 95 % portlandského slínku, pevnostní třída je 42,5 s vysokými počátečními pevnostmi
- **CEM III / A 42,5 N:** - Vysokopecní cement směsný obsahuje 36 – 65 % vysokopecní strusky a 35 – 64 % portlandského slínku, pevnostní třída je 42,5 s normálními počátečními pevnostmi, vysokopecní struska a portlandský slínek se mele každý zvlášť
- **Kamenivo 0/4 Tovačov:** - drobné těžené kamenivo
- **Kamenivo 4/8 Tovačov:** - hrubé těžené kamenivo
- **Kamenivo 8/16 Hrabůvka:** - hrubé drcené kamenivo, Moravská droba
- **Voda:** - pitná voda
- **Superplastifikátor:** - MasterGlenium SKY 665, superplastifikační přísada na bázi polykarboxyláteteru, určená pro výrobu transportbetonu, doporučené dávkování je 0,2 % až 3,0 % hmotnosti cementu
- **Provzdušňovací přísada:** - MasterAir 214, provzdušňovací přísada, s jejíž pomocí je možno vytvořit v betonu systém ultra-stabilních vzduchových kulových pórů s optimálním průměrem a vysokým měrným povrchem, doporučené dávkování je 0,05 – 1,5 % z váhy cementu

7. Výsledky měření

Zkušební vzorky byly vyrobeny v akreditované zkušební laboratoři BETOTECH v Ostravě – Vítkovicích.

7.1. *Zkoušky čerstvého betonu*

Výsledné hodnoty jsem zpracovala do tabulek.

7.1.1. Konzistence a obsah vzduchu

Tabulka 2: Výsledné hodnoty obsahu vzduchu a konzistence čerstvého betonu

	CEM I 42,5 R, C 30/37 , XF4			CEM III 42,5 A, C 30/37 , XF4		
	A	B	C	A	B	C
vzduch [%]	5	6	6,3	6	6,4	5,6
průměrná hodnota obsahu vzduchu [%]	5,8			6		
konzistence [mm]	140	150	160	140	170	180
průměrná hodnota konzistence čerstvého betonu [mm]	150			163		

	CEM I 42,5 R, C 25/30 , XF3			CEM III 42,5 A, C 25/30 , XF3		
	A	B	C	A	B	C
vzduch [%]	6,4	5	4,8	5,5	5	5
průměrná hodnota obsahu vzduchu [%]	5,4			5,2		
konzistence [mm]	110	120	130	130	130	120
průměrná hodnota konzistence čerstvého betonu [mm]	120			127		

7.1.2. AVA

Tabulka 3: Výsledné hodnoty zkoušky AVA

	P37- C30/37	S37- C30/37	P30 - C25/30	S30 - C25/30
spacing factor [mm]	0,19	0,17	0,21	0,21
obsah vzduchových pórů < 300 [μmm]	3,2	3,4	2,2	2,2
obsah vzduchu v cementové pastě [%]	20,4	18,2	10,7	11,1
specifický povrch vzduchových pórů [mm ⁻¹]	24	28,9	27,1	28,7

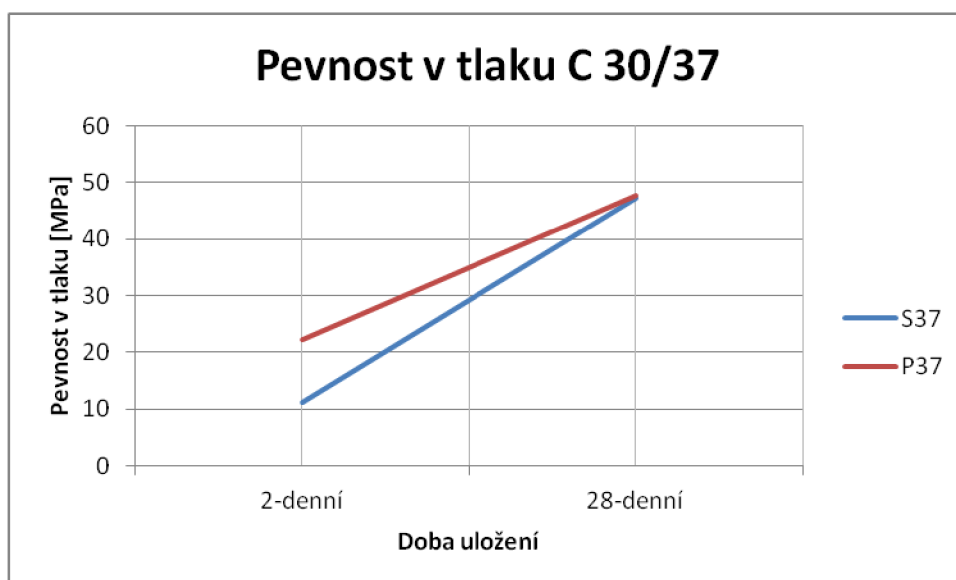
7.2. Zkoušky ztvrdlého betonu

7.2.1. Pevnost v tlaku

Pevnosti byly zkoušeny na krychlích o délce hrany 150 mm a byly zkoušeny ve stáří 2, 3 a 28 dní, byla u nich zjištěna vždy objemová hmotnost ztvrdlého betonu. Grafy jsou vytvořeny z průměrných hodnot.

Tabulka 4: Hodnoty pevnosti v tlaku betonů C 30/37

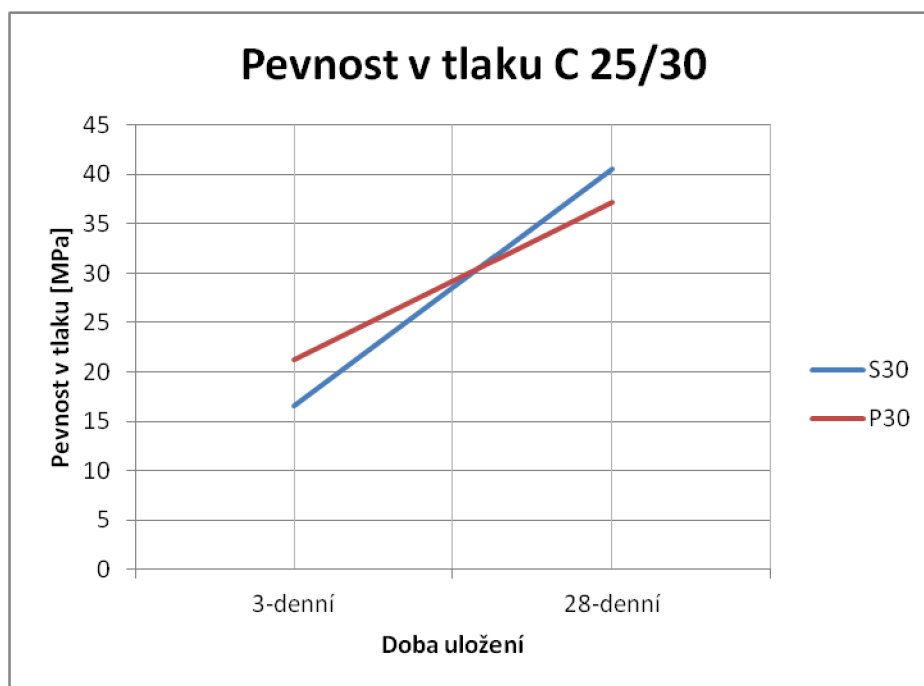
	CEM I 42,5 R, C 30/37 , XF4			CEM III 42,5 A, C 30/37 , XF4		
	A	B	C	A	B	C
obj. hmotnost po 2 dnech [kg/m ³]	2290	2250	2230	2240	2200	2250
2-denní pevnost v tlaku [MPa]	23,5	19,7	23,7	12,4	11,4	10,3
průměrná hodnota 2-denní pevnosti v tlaku [MPa]	22,3			11,4		
obj. hmotnost po 28 dnech [kg/m ³]	2310	2250	2250	2260	2250	2270
28-denní pevnost v tlaku [MPa]	51,6	46,2	45,7	46,9	45,9	49,2
průměrná hodnota 28-denní pevnosti v tlaku [MPa]	47,8			47,3		



Obrázek 15: Graf průměrných hodnot pevnosti v tlaku betonů C 30/37

Obrázek 16: Hodnoty pevnosti v tlaku betonů C 25/30

	CEM I 42,5 R, C 25/30 , XF3			CEM III 42,5 A, C 25/30 , XF3		
	A	B	C	A	B	C
obj. hmotnost po 3 dnech [kg/m ³]	2110	2280	2280	2260	2240	2230
3-denní pevnost v tlaku [MPa]	19,1	22,3	22,2	13,8	14,6	14,5
průměrná hodnota 3-denní pevnosti v tlaku [MPa]	21,2			16,6		
obj. hmotnost po 28 dnech [kg/m ³]	2140	2280	2270	2240	2250	2250
28-denní pevnost v tlaku [MPa]	30,6	39,5	41,5	40,8	40,2	40,9
průměrná hodnota 28-denní pevnosti v tlaku [MPa]	37,2			40,6		



Obrázek 17: Graf průměrných hodnot pevnosti v tlaku betonů C 25/30

7.2.2. Průsak tlakovou vodou

Zkouška hloubky průsaku tlakovou vodou byla provedena na krychlích o hraně 150 mm. V následující tabulce jsou uvedeny výsledné hodnoty.

Tabulka 5: Výsledky zkoušky hloubky průsaku tlakovou vodou

	CEM I 42,5 R, C 30/37 , XF4			CEM III 42,5 A, C 30/37 , XF4		
	A	B	C	A	B	C
průsak vody [mm]	8	10	13	20	17	12
průměrná hodnota [mm]	10			16		

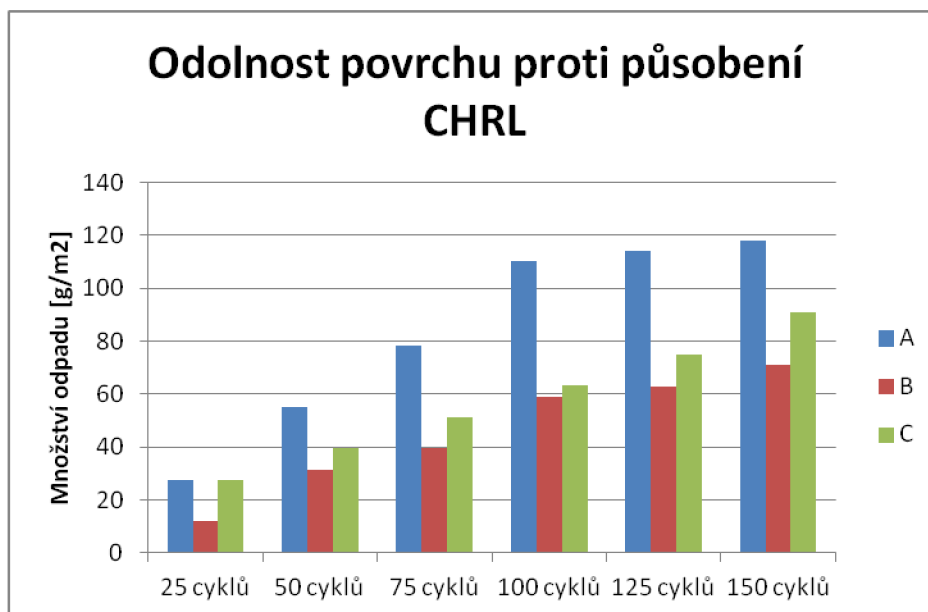
	CEM I 42,5 R, C 25/30 , XF3			CEM III 42,5 A, C 25/30 , XF3		
	A	B	C	A	B	C
průsak vody [mm]	9	20	19	14	10	11
průměrná hodnota [mm]	16			12		

7.2.3. Odolnost povrchu proti působení chemických rozmrazovacích látek

Odolnost povrchu proti působení CHRL byly zkoušeny na krychlech o délce hrany 150 mm.

Tabulka 6: Odpady při zkoušce CHRL - P37 - C 30/37

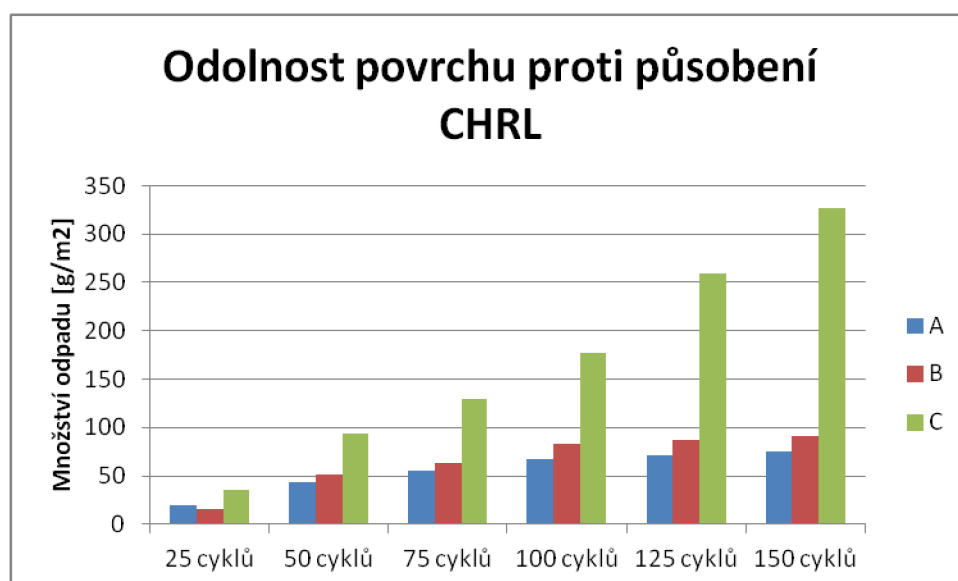
P 37 - C30/35-XF4 Odolnost povrchu proti působení CHRL- metoda A- dle ČSN 73 1326 + Z1							
	25 cyklů	50 cyklů	75 cyklů	100 cyklů	125 cyklů	150 cyklů	jednotka
A	27,5	55,1	78,1	110,1	114,1	118	[g/m ²]
B	11,8	31,5	39,4	59,1	63	70,9	[g/m ²]
C	27,6	39,4	51,2	63,1	74,9	90,7	[g/m ²]



Obrázek 18: Graf výsledných odpadů P37 - C 30/37

Tabulka 7: Odpady při zkoušce CHRL – S37 – C 30/35

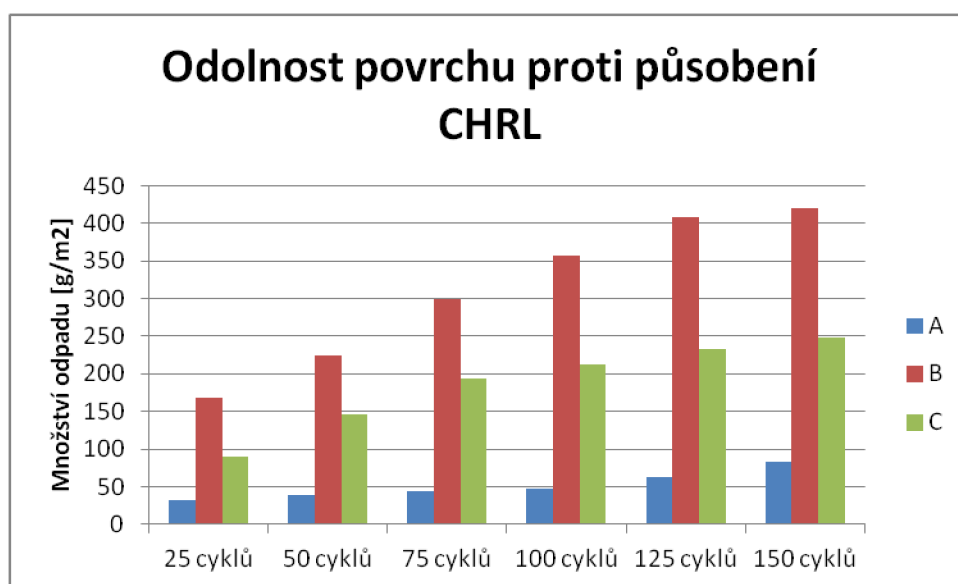
S 37-C30/35- XF4 Odolnost povrchu proti působení CHRL - metoda A-dle ČSN 731326 + Z1							
	25 cyklů	50 cyklů	75 cyklů	100 cyklů	125 cyklů	150 cyklů	jednotka
A	19,7	43,3	55,1	67	70,9	74,8	[g/m ²]
B	15,7	51,1	62,9	82,6	86,5	90,5	[g/m ²]
C	35,4	94,4	129,8	177	259,6	326,5	[g/m ²]



Obrázek 19: Graf výsledných odpadů S37 – C 30/37

Tabulka 8: Odpady při zkoušce CHRL – P30 – C 25/30

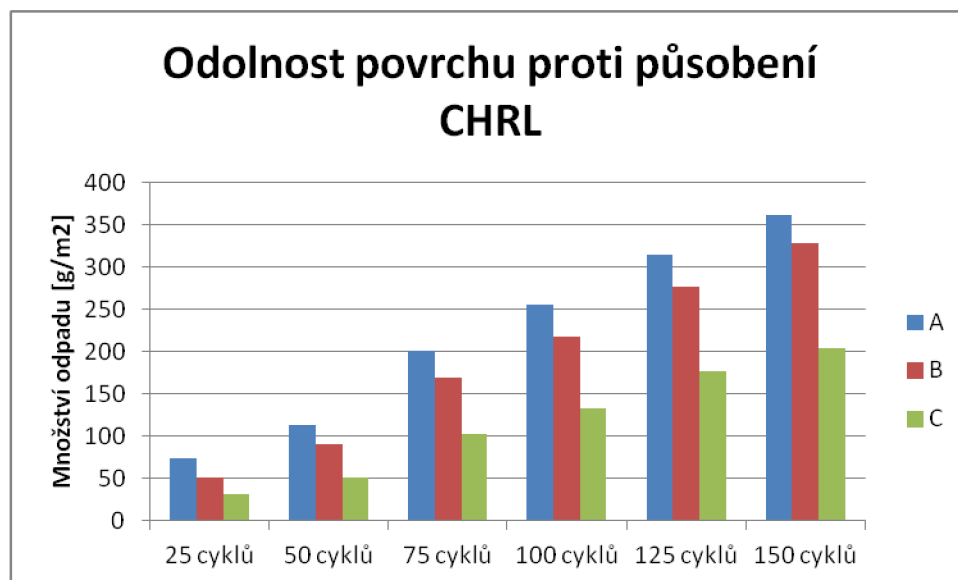
P 30 - C25/30 - XF3 Odolnost povrchu proti působení CHRL - metoda A- dle ČSN 73 1326 + Z1							
	25 cyklů	50 cyklů	75 cyklů	100 cyklů	125 cyklů	150 cyklů	jednotka
A	31,5	39,4	43,3	47,3	63	82,7	[g/m ²]
B	168,9	224	298,6	357,5	408,6	420,4	[g/m ²]
C	90,7	145,9	193,2	213	232,7	248,5	[g/m ²]



Obrázek 20: Graf výsledných odpadů P30 – C 25/30

Tabulka 9: Odpady při zkoušce CHRL – S30 – C25/30

S 30 - C25/30 - XF3 Odolnost povrchu proti působení CHRL- metoda A- dle ČSN 73 1326 + Z1							
	25 cyklů	50 cyklů	75 cyklů	100 cyklů	125 cyklů	150 cyklů	jednotka
A	74,6	113,9	200,3	255,2	314,1	361,2	[g/m ²]
B	51,3	90,7	169,6	216,9	276,1	327,3	[g/m ²]
C	31,4	51,1	102,2	133,6	176,8	204,3	[g/m ²]

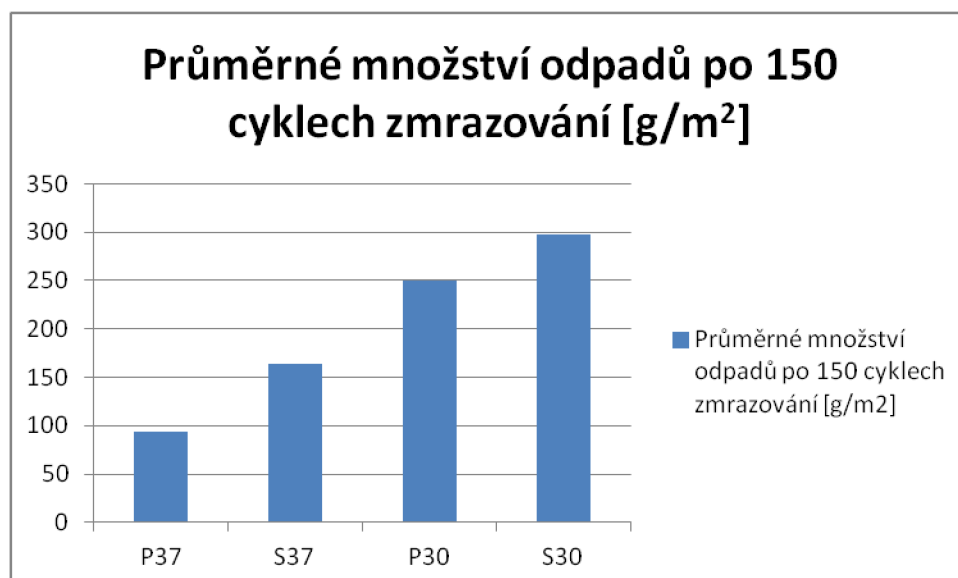


Obrázek 21: Graf výsledných odpadů S30 – C 25/30

U porovnání odolností povrchu proti působení CHRL jsem u grafu použila průměrné hodnoty množství odpadu betonů po 150 cyklech zmrazování.

Tabulka 10: Průměrné hodnoty odolnosti povrchu proti působení CHRL

	P37	S37	P30	S30
Průměrné množství odpadů po 150 cyklech zmrazování [g/m ²]	93,2	163,9	250,5	297,6



Obrázek 22: Graf průměrných odpadů při zkoušce CHRL

7.2.4. Mrazuvzdornost

Zkušební trámce byly poslány do laboratoře v Brně. Zkouška je časově náročná. Výsledky budou doplněny u obhajoby u státní závěrečné zkoušky.

8. Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo připravit zkušební směsi a stanovit základní mechanické-fyzikální vlastnosti a vhodnost možnosti náhrady portlandských cementů, cementy směsnými pro betony používaných při dálničních stavbách. Dále je porovnat a vyhodnotit. Pro tuto práci byly navrženy čtyři směsi. Jednalo se o dvě směsi betonu, kde byl přidán portlandský cement a další dvě směsi, kde byl přidán cement směsný. Z každého druhu cementu byla směs navržena na agresivní prostředí typu XF3 a XF4.

V teoretické části byly popsány informace o výrobě, složení a vlastnosti cementu. Taktéž hydratační reakce, které probíhají při tuhnutí cementu a betonu. V poslední kapitole teoretické části byly popsány latentně hydraulické vlastnosti příměsí, které se používají do cementů. Při vypracování jsem vycházela z české a zahraniční odborné literatury.

V praktické části byly sledovány fyzikálně-mechanické vlastnosti betonů s portlandskými cementy a směsnými cementy z cementárny hranice. U konkrétního cementu, který byl použit CEM III/A 42,5 N je důležité zdůraznit, že vysokopecní struska a portlandský slínek se v cementárně mele zvlášť. Zkušební krychle byly vyrobeny v akreditované laboratoři BETOTECH v Ostravě-Vítkovicích. Na čerstvém betonu byly provedeny zkoušky konzistence sednutím kužele, obsah vzduchu a AVA. Následovaly dvoudenní pevnosti v tlaku a 28- denní pevnosti v tlaku. Po 28 dnech byly zkušební krychle nasazeny na zkoušku průsaku tlakovou vodou a na odolnost povrchu proti působení chemickým rozmrazovacím látkám. Zkušební trámce byly poslány do laboratoře v Brně.

Při konkrétních zkouškách jsem pozorovala chování vzorků. Zkouška AVA a obsah vzduchu v čerstvém betonu vyšla u obou typů betonu podobná. U pevnosti v tlaku jsem zjistila, že dvoudenní pevnosti betonů kde byl použitý cement směsný je menší než u betonu, kde byl použitý cement portlandský. Ale pevnost po 28 dnech se změnila a betony s použitým cementem směsným dosahují vyšších pevnosti v tlaku. Tento výsledek dokazuje, že pevnosti s použitým směsným cementem se budou nadále zvyšovat. Co se týče zkoušky hloubky průsaku tlakovou vodou, jsou výsledky u obou betonů přibližně stejné. U odolnosti povrchu proti působení chemických rozmrazovacích látek je

množství odpadů po 150 cyklech zmrazování větší u betonu, kde byl použitý cement směsný. Rozdíl je však malý a betony se směsným cementem s rezervou splní požadavky na stanovený vliv prostředí.

9. Seznam literatury

- [1] PYTLÍK, Petr. *Technologie betonu*. 2. vydání. Brno: VUTUM, 2000. ISBN 80-214-1647-5.
- [2] COLLEPARDI, Mario. *Moderní beton*. Praha: ČKAIT, 2009. ISBN 978-80-87093-75-7.
- [3] BAJZA, Adolf a Ildikó ROUSEKOVÁ. *Technológia betónu*. Bratislava: Jaga group, 2006. ISBN 8080760322.
- [4] *EBeton* [online]. Praha: Sunnysoft, 2016 [cit. 2016-04-15]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/>
- [5] VAVRO, Martin. *Studijní materiály do předmětu Využití stavebních surovin*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita, FAST, 2008
- [6] *Geologie* [online]. Hornicko-geologická fakulta Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava [cit. 2016-04-16]. Dostupné z: <http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/kamenivo.html>
- [7] *Geologie* [online]. Hornicko-geologická fakulta Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava [cit. 2016-04-16]. Dostupné z: http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/anorganicka_pojiva.html
- [8] KRESTA, František. *Využití stavebních surovin*. [přednáška]. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita, 2016
- [9] JANÍČKOVÁ, Petra. *Systémy rychle tuhnoucích směsí na bázi portlandských cementů* [online]. Brno, 2008 [cit. 2016-04-16]. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Prof. Ing. Karel Rusín, CrSc.
- [10] FEČKO, Peter. *Popílky*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2003. ISBN 80-248-0327-5.
- [11] KRESTA, František. *Druhotné suroviny ve výrobě stavebních hmot*. [přednáška]. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita, 2016
- [12] ČSN EN 12350-2: *Zkoušení čerstvého betonu - Část 2: Zkouška sednutím*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [13] ČSN EN 12350-7: *Zkoušení čerstvého betonu - Část 7: Obsah vzduchu - Tlakové metody*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.

- [14] ČSN EN 12 390-3: *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. Praha: Český normalizační institut, 2009.
- [15] ČSN EN 12390-8: *Zkoušení čerstvého betonu - Část 7: Obsah vzduchu - Tlakové metody*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [16] ČSN EN 73 1326: *Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek*. Praha: Úřad pro normalizaci a měření, 1985.
- [17] ČSN EN 73 1322: *Stanovení mrazuvzdornosti betonu*. Praha: Úřad pro normalizaci a měření, 1968.
- [18] ČSN EN 73 1322: *Stanovení mrazuvzdornosti betonu*. ZMĚNA Z1. Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [19] ČSN EN 73 1326: *Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek*. ZMĚNA Z1. Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [20] ČSN EN 197-1: *Cement – Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití*. Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [21] ČSN EN 196-2: *Metody zkoušení cementu - Část 2: Chemický rozbor cementu*. Praha: Výzkumný ústav maltovin, 2013.
- [22] *Příručka technologa BETON. 1. Vydání*. Českomoravský beton, Českomoravský cement, Českomoravský štěrk, 2010. Firemní literatura.
- [23] TĚHNÍK, Vladimír, Radovan NEČAS a Dana KUBÁTOVÁ. *Vápenec jako základní kámen maltovin* [online]. Výzkumný ústav stavebních hmot a. s., 2008, 12 stran [cit. 2016-04-21]. Dostupné z: <http://www.svcement.cz/includes/dokumenty/pdf/sd2008-prednaska-vt-vapence.pdf>
- [24] Air Void Analyzer. [přednáška]. Ostrava, 2012.
- [25] AVA: *Catalog NDT-2010 feb 10-2.doc* [online]. Německo, 6 stran [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: <http://www.germann.org/TestSystems/AVA%20-%20Air%20Void%20Analyzer/AVA%20-%20Air%20Void%20Analyzer.pdf>

Seznam obrázku

Obrázek 1: Hydratace cementu [4]	11
Obrázek 2: Schematické znázornění hydratace a tvorby novotvarů v časové závislosti [1]12	
Obrázek 3: Surovinový mlýn [7]	19
Obrázek 4: Rotační pec pro suchý způsob výroby cementu [7]	20
Obrázek 5: Zjednodušené technologické schéma výroby cementu [7]	22
Obrázek 6: Zkouška sednutí kužele dle ČSN EN 12350-2 [12]	33
Obrázek 7: Zkouška sednutí kužele v laboratoři	33
Obrázek 8: Zkoušení obsahu vzduchu čerstvého betonu	34
Obrázek 9: Jednotlivé kroky zkoušky [25]	35
Obrázek 10: Přístroj potřebný ke zkoušce A V A [24]	36
Obrázek 11: Zkoušení 2 - denní pevnosti v tlaku	37
Obrázek 12: Hloubka průsaku tlakovou vodou	38
Obrázek 13: Rozlomená zkušební krychle z vyznačenou hloubkou průsaku	38
Obrázek 14: Zkušební krychle po 150 cyklech	39
Obrázek 15: Graf průměrných hodnot pevnosti v tlaku betonů C 30/37	43
Obrázek 16: Hodnoty pevnosti v tlaku betonů C 25/30	44
Obrázek 17: Graf průměrných hodnot pevnosti v tlaku betonů C 25/30	44
Obrázek 18: Graf výsledných odpadů P37 - C 30/37	46
Obrázek 19: Graf výsledných odpadů S37 – C 30/37	46
Obrázek 20: Graf výsledných odpadů P30 – C 25/30	47
Obrázek 21: Graf výsledných odpadů S30 – C 25/30	48
Obrázek 22: Graf průměrných odpadů při zkoušce CHRL	48

Seznam tabulek

Tabulka 1: Návrh zkušebních betonových směsí	40
Tabulka 2: Výsledné hodnoty obsahu vzduchu a konzistence čerstvého betonu	42
Tabulka 3: Výsledné hodnoty zkoušky AVA	42
Tabulka 4: Hodnoty pevnosti v tlaku betonů C 30/37	43
Tabulka 5: Výsledky zkoušky hloubky průsaku tlakovou vodou	45
Tabulka 6: Odpady při zkoušce CHRL - P37 - C 30/37	45
Tabulka 7: Odpady při zkoušce CHRL – S37 – C 30/35.....	46
Tabulka 8: Odpady při zkoušce CHRL – P30 – C 25/30.....	47
Tabulka 9: Odpady při zkoušce CHRL – S30 – C25/30.....	47
Tabulka 10: Průměrné hodnoty odolnosti povrchu proti působení CHRL.....	48

Přílohy

Technický list CEM I 42,5 R

Technický list CEM III / A 42,5 N

Protokol AVA P37

Protokol AVA S37

Protokol AVA P30

Protokol AVA S30

Protokol pevnosti v tlaku po 2 dnech P37

Protokol pevnosti v tlaku po 28 dnech P37

Protokol pevnosti v tlaku po 2 dnech S37

Protokol pevnosti v tlaku po 28 dnech S37

Protokol pevnosti v tlaku po 3 dnech P30

Protokol pevnosti v tlaku po 28 dnech P30

Protokol pevnosti v tlaku po 3 dnech S30

Protokol pevnosti v tlaku po 28 dnech S30

Protokol průsaku tlakovou vodou P37

Protokol průsaku tlakovou vodou S37

Protokol průsaku tlakovou vodou P30

Protokol průsaku tlakovou vodou S30

Protokol odolnosti povrchu proti působení CHRL P37

Protokol odolnosti povrchu proti působení CHRL S37

Protokol odolnosti povrchu proti působení CHRL P30

Protokol odolnosti povrchu proti působení CHRL S30